

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE TRAYECTORIA EN CODELCO
DIVISION ANDINA.

Trabajo de Titulación
para optar al Título de Técnico
Universitario en Minería y
Metalurgia.
Nombre: Martín Ignacio
Aránguiz Guerra.
Profesor Guía: Mg. Ing.
Carlos Baldi González.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Metodología de Medición de Trayectoria en Codelco División Andina

Nombre del candidato(a): Martín Ignacio Aránguiz Guerra

Carrera / Grado: Técnico Universitario en Minería y Metalurgia

Campus: Viña del Mar Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03.03.2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/01/2025 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

La medición de sondajes se orienta a ampliar la información de este; como la longitud del pozo, inclinación, azimut, y muchas otras más características que puedan permitir una correlación entre distintos pozos que son hechos dentro de una misma zona o plataforma.

Dentro de las mediciones de sondaje existen una variedad de métodos para poder determinar distintos parámetros que se encuentran en este, en donde, se hablará de la medición de trayectoria específicamente, que es un método el cual se utiliza para poder tomar información respecto a la orientación del pozo, cuál es su ubicación geográfica y cuánto porcentualmente este sondaje fue desviado tomando en cuenta los datos determinados por el cliente que se le otorga este servicio.

Esta metodología de mediciones se dará a conocer con el fin de entregar información referente a este trabajo y servicio minero que se hace actualmente en la minería y no es tan conocido a pesar de los años de ejecución que esta lleva en el mercado.

En el capítulo 1 de este trabajo se entregará información referente a lo que es, como se originó y cual es el fin e importancia de la medición de trayectoria, esto se hace con fines de otorgar conocimiento respecto a esta labor que se efectúa hace muchos años en la industria minera y no es tan conocido como debiese, dando así a demostrar el por qué es tan importante dentro de la competencia de hoy en día.

En el capítulo 2 se dará a conocer los instrumentos utilizados en la medición de trayectoria de manera más específica que se utilizan dentro de la medición de trayectoria, cuál es su funcionalidad y costo que tienen en el mercado actualmente, junto con ello, el lugar donde se hará efectiva una medición de trayectoria e informes.

En el capítulo 3, una vez realizada la medición de trayectoria, se analizarán los resultados obtenidos y se buscara obtener mediante un cálculo matemático el porcentaje de desviación que posee el sondaje y junto con ello, la interpretación de los datos obtenidos.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	2
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVO ESPECÍFICO	9
CAPÍTULO 1: MEDICION DE TRAYECTORIA.	10
1.1. LA MINERÍA EN CHILE	11
1.2. QUALITY SURVEY SERVICES.	13
1.3. MEDICIÓN DE TRAYECTORIA.	14
1.4. HISTORIA DE LA MEDICIÓN DE TRAYECTORIA.	15
1.5. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.	17
1.5.1. Ingreso al Área.	17
1.5.2. Armado de Equipo.	19
1.5.3. Bloqueo de equipo de perforación.	20
1.5.4. Medición de pozo con camioneta Q.S.S.	20
1.5.5. Medición de pozo sin camioneta Q.S.S.	22
1.5.6. Retiro del giroscopio y desarme.	24
1.5.7. Retiro del área.	25
CAPÍTULO 2: INSTRUMENTOS DE MEDICION, COSTO Y REALIZACION DE MEDICIÓN DE TRAYECTORIA.	26
2.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.	27
2.1.1. GyroMaster SPT.	27
2.1.2. GyroLogic SPT.	29
2.2. MEDICIÓN DE TRAYECTORIA EN CODELCO ANDINA.	33
2.2.1. CODELCO DIVISIÓN ANDINA.	33
2.2.2. SERVICIO DE MEDICIÓN DE TRAYECTORIA.	34

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.	41
3.1. FORMULA DE DESVIACION DE SONDAJE.	42
3.1.1. Cálculo de Distancia Horizontal Acumulada del sondeaje.	44
3.1.2. Cálculo de Coordenadas Programadas al final del sondeaje.	45
3.1.3. Cálculo de Diferencia entre la Coordenada Programada al final del sondeaje con la Coordenada final.	46
3.1.4. Cálculo de Porcentaje de Desviación.	46
3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	47
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA.	54
ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	GyroLogic SPT.
Figura 1-2	GyroMaster SPT.
Figura 1-3	Representación tridimensional de la trayectoria de un sondaje.
Figura 1-4	Ejemplo de posicionamiento de camioneta para realización de medición de trayectoria.
Figura 1-5	Polea instalada junto con tapón y grillete.
Figura 1-6	Equipamiento para camioneta Q.S.S.
Figura 1-7	Zona de trabajo para medición.
Figura 1-8	Equipo de medición enganchado con el pescante de la sonda.
Figura 1-9	Pino.
Figura 1-10	Instalación de cuenta metros sobre el Chuck.
Figura 1-11	Operador realizando medición con cuenta metros.
Figura 2-1	GyroMaster perteneciente a Q.S.S.
Figura 2-2	Gyrologic perteneciente a Q.S.S.
Figura 2-3	Codelco División Andina.
Figura 2-4	Camioneta Q.S.S. realizando medición en sondaje Aire – Reverso (RC).
Figura 2-5	Ubicación geográfica fase 6 Codelco División Andina.
Figura 2-6	Fase 6 Codelco División Andina.
Figura 2-7	Ejemplo de ART (Análisis del Riesgo de la Tarea).
Figura 3-1	Representación gráfica de desviación de trayectoria presente en sondaje 6423.
Figura 3-2	Muestras de maquina diamantina en Fase 6, Codelco Andina.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa técnica entre GyroMaster y GyroLogic.

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

A. SIGLAS

Q.S.S: Quality Survey Services.

ART: Análisis del Riesgo de la Tarea.

RC: Reverse Circulation.

SPT: Stockholm Precision Tools.

QA/QC: Aseguramiento y control de calidad.

DH: Distancia horizontal acumulada del sondaje.

SpA: Sociedad por Acciones.

DDH: Diamond Drill Hole.

MWD: Measurement While Drilling.

LWD: Logging While Drilling.

B. SIMBOLOGÍA

KTMF: Miles de toneladas métricas finas.

Δ : Delta

°: Grados

Cu: Cobre.

INTRODUCCIÓN

Los servicios Geofísicos de la empresa Quality Survey Services, consisten en la medición de la trayectoria o desviación de sondajes, estos registros geofísicos son obtenidos por una sonda con varios sensores o antenas transmisoras y receptoras que se introducen en una perforación diamantina o de una máquina perforadora de aire – reverso, para determinar las características de cada zona que se desea a conocer.

Es importante destacar que los instrumentos y equipos que se utilizan en estos trabajos están perfectamente condicionados y contruidos de materiales resistentes y aptos para enfrentar las condiciones climáticas extremas, vibraciones, caídas y además cuentan con resistencia al agua.

La empresa Q.S.S (Quality Survey Services) además, cuenta con una serie de metodologías para determinar la trayectoria y desviación de pozos (giroscópica, magnética, tiros múltiples) en donde, la información obtenida es analizada por modernos softwares que son una real ayuda para la presentación de los datos obtenidos, pudiendo ser mostradas en formatos de tablas y gráficos, en donde se aprecia la desviación que se produce en el pozo o sondaje que se esté analizando.

La compañía se destaca por presentar alta tecnología en sus instrumentos, con el fin de obtener la mayor fidelidad y exactitud de datos solicitados, dentro de su nueva instrumentación se apoyan con GyroLogic y Gyromaster, los cuales son instrumentos de precisión especialmente creados y contruidos para las mediciones de trayectoria.

OBJETIVO GENERAL:

- Entregar una metodología de trabajo referente a la medición de trayectoria de sondeos que permita a estudiantes adquirir conocimientos fundamentales sobre los procesos, herramientas e interpretación de datos asociados a esta práctica, contribuyendo así su aplicación en contextos reales de exploraciones mineras.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Entregar información referente a lo que es la medición de trayectoria, junto con el procedimiento de trabajo para determinar la gran importancia que presenta este servicio en la faena minera actualmente.
- Definir los instrumentos de medición utilizados en una medición de trayectoria, cuál es su costo y mediante una medición de trayectoria, revelar los datos que entrega, demostrando así su funcionalidad y modo de uso.
- Analizar los resultados obtenidos de la medición de trayectoria mediante un cálculo matemático que permita calcular el porcentaje de desviación presente en el sondeo.

CAPÍTULO 1: MEDICIÓN DE TRAYECTORIA

1.1. LA MINERÍA EN CHILE.

Chile es el mayor productor y exportador de cobre en el mundo, lo que es de gran importancia para los chilenos, nuestra economía, nuestra sociedad y cultura. La minería ha estado en la historia de Chile desde siempre y forma parte de nuestra identidad como nación. Mucho antes de que los españoles llegaran a América, los indígenas que habitaban estas tierras sacaban el mineral de cobre de la cordillera de Los Andes y lo utilizaban para fabricar herramientas y adornos (Consejo Minero, 2023).

Luego, durante los primeros 200 años de la Conquista, el cobre fue una industria pequeña que se realizaba básicamente en la zona norte del país. Recién en 1820 comenzó la expansión de la producción, que abarcó desde la Región de Atacama hasta la Región del Aconcagua.

Durante los siglos XIX y XX, Chile se posicionó como importante productor de cobre a nivel mundial y recibió ingenieros y especialistas en minas y metalurgia desde el extranjero. Asimismo, creció la inversión extranjera en el rubro minero, especialmente norteamericana, inglesa, francesa, alemana e italiana. Adelantos como el uso de carbón mineral, la construcción de ferrocarriles y nuevas fundiciones dieron un gran impulso a la minería nacional.

Luego de una baja en la producción de cobre a fines de 1800, el país vivió otra alza del cobre a inicios del siglo XX, cuando varias compañías estadounidenses realizaron grandes inversiones para explotar los yacimientos de Chuquibambilla, Potrerillos y El Teniente.

Chile consolidó su posición como segundo país productor de cobre en el mundo a mediados del siglo XX, después de Estados Unidos, y posteriormente, en la década de los ochenta, pasó a ser primer productor mundial. Luego de los procesos de chilenización, con la formación de sociedades mixtas entre el Estado de Chile y las empresas privadas extranjeras, y la posterior nacionalización que culminó en julio de 1971, estos

yacimientos pasaron a propiedad del Gobierno de Chile. Mediante el Decreto Ley Número 1.350/76, se creó la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO-CHILE), que es la encargada de su explotación y de la comercialización del cobre que producen.

La minería en general, pero particularmente la del cobre, ha llegado a ser el sector más activo en el desarrollo de la economía nacional debido al monto de sus inversionistas y la magnitud alcanzada en la producción de cobre.

La minería, y especialmente la producción de cobre, es un factor clave para la economía chilena, ya que posee aproximadamente el 15% del PIB, el 60% de las exportaciones y el 20% de los ingresos fiscales provienen de esta industria (Consejo Minero, 2023).

Bajo esta información y tomando en cuenta lo importante que es para nuestro país la minería, es propicio destacar que, en Chile, la industria minera siempre irá acompañada de una constante producción, y esta va de la mano con la medición de trayectoria de sondajes, debido a la gran influencia que esta tiene para poder identificar ubicaciones sobre yacimientos con mineral de gran interés para la industria minera actualmente, lo que se transforma en un factor importante que siempre requerirá precisión, especialmente en la optimización de la extracción y la seguridad de las operaciones mineras, con el fin de evitar gastos hormiga que pueden llegar a afectar hacia las distintas compañías que se dedican a este rubro, que no necesariamente deben ser chilenas.

Las tecnologías de medición de trayectoria, como el uso de sensores giroscópicos en herramientas de sondeo de pozos, permiten una representación tridimensional precisa de la ruta de los pozos mineros, lo que facilita la planificación y ejecución de las actividades mineras. Esto, a su vez, conduce a una mayor eficiencia en la extracción, reducción de costos y mejora de la seguridad de los trabajadores.

1.2. QUALITY SURVEY SERVICES

El término referido a medición de trayectoria lleva décadas en la industria minera, dado es el caso con Quality Survey Services, quienes como empresa comenzaron a ejercer este servicio desde 2012, entregando información y resultados óptimos en este ámbito tanto en proyectos mineros a rajo abierto como en minería subterránea.

Actualmente, Q.S.S. opera con instrumentos de medición giroscópicos de última generación, como es el caso de GyroLogic SPT y el GyroMaster SPT, ambos fabricados por Stockholm Precision Tools. Estos equipos son resistentes a condiciones climáticas extremas, vibraciones y humedad, garantizando mediciones de trayectoria confiables (Figuras 1-1 y 1-2).

En la Figura 1-1 se observa el GyroLogic SPT, diseñado para mediciones todo-en-uno, con alta precisión y facilidad de transporte. La Figura 1-2 muestra el GyroMaster SPT, la cual posee una tecnología patentada llamada Navibore, la cual registra datos de manera continua y con mínima deriva.



No se ve afectado por entornos magnéticos

GyroLogic™ es una herramienta de referencia giroscópica de estado sólido de vanguardia, que garantiza una alta inmunidad a las perturbaciones magnéticas. Esto lo hace ideal para ser utilizado en proyectos que presenten este tipo de perturbaciones, ya que se asegura su precisión y fiabilidad en todo momento.

Fuente: Extracto de imagen derivado de datos de Stockholm Precision Tools (2025).

Figura 1-1: GyroLogic SPT.



Fuente: Extracto de imagen sacado de la página web de SPT.

Figura 1-2: GyroMaster SPT.

1.3. MEDICIÓN DE TRAYECTORIA

Una medición de trayectoria en sondajes es un servicio que es utilizado para conocer la información y su correspondiente recopilación de datos respecto a la inclinación y dirección que presenta un sondaje el cual fue perforado ya sea tanto por una máquina diamantina como de aire – reverso, el cual, esto es crucial para alcanzar objetivos geológicos, como es el caso de la mejora en la localización de recursos minerales, reduciendo desviaciones respecto a su trayectoria planificada (dato que es entregado por el cliente), como también, ayuda a evaluar las reservas minerales dependiendo si los sondajes corresponden a producción o de exploración (SPT, 2024).

Con los datos obtenidos, es posible elaborar modelos tridimensionales del yacimiento, identificar zonas con mayor concentración de mineral y optimizar la planificación de extracción. Esto impacta directamente en la eficiencia operativa y en la reducción de costos.

1.4. HISTORIA DE LA MEDICION DE TRAYECTORIA

A pesar de que la medición de trayectoria como tal es un servicio que no es muy conocido en la industria minera, esta se lleva haciendo desde la antigüedad, en donde, en la civilización de la China antigua (~200 años a.C.) se hacían perforaciones para buscar agua, sal o gas, aunque sin control sobre la dirección del pozo.

Ya una vez pasando los años en la Edad Media y Renacimiento se empezaron a usar herramientas más especializadas en minería europea, como lo eran los barrenos manuales para hallar vetas minerales, pero aun así la perforación seguía siendo a ciegas.

Con la Revolución Industrial (Siglo XIX) aparece la perforación mecánica en la minera y en la industria petrolera, es aquí donde surge la necesidad real de controlar la dirección del sondaje, debido a que se estaban haciendo perforaciones más profundas.

El nacimiento de la medición de trayectoria como tal da a comienzos de los años 1920 aproximadamente, en donde, en EE. UU. comienzan a desarrollarse las primeras herramientas para medir la dirección de los pozos, las cuales, las primeras eran unas brújulas mecánicas, que se bajaban dentro del pozo para registrar el ángulo de inclinación y azimut.

Estas herramientas eran “single-shot”, es decir, herramientas las cuales solo podían tomar una medición a la vez y debían ser retirados del pozo para leer los datos, con el tiempo después aparecieron las herramientas “multi-shot”, las cuales podían registrar varios datos en una misma bajada.

Ya para los años 1950 – 1970 mejora la precisión agregando sistemas ópticos y cámaras fotográficas dentro de las herramientas, después integran giroscopios, los cuales no dependen del campo magnético, lo que los convierten en herramientas ideales para zonas donde el magnetismo interfiere, como, por ejemplo, con la presencia de hierro.

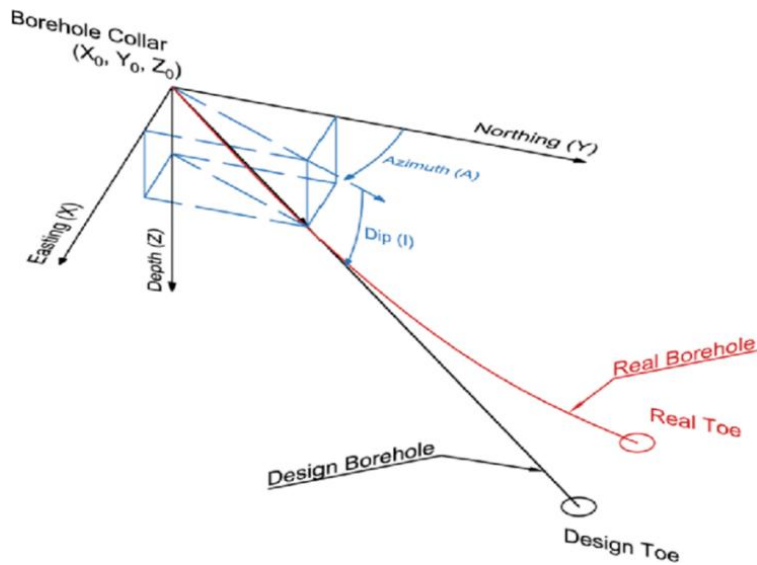
Para las décadas de los 80 a 90, llegan los sensores electrónicos y sistemas computarizados, los cuales permiten leer datos en tiempo real, como es el caso de los MWD (measurement while drilling) y LWD (Logging while drilling), que permiten obtener información sin detener la perforación.

A finales del siglo XX, la medición de trayectoria fue clave para la minería subterránea y a cielo abierto, ya que ayuda para seguir vetas mineras con precisión, evita errores de interpretación geológica, mejora la eficiencia en campañas de exploración y ayuda a evitar pérdidas económicas por pozos desviados.

Hoy en día la medición de trayectoria es realizada con inclinómetros magnéticos/ giroscopios, equipos como es el caso de GyroLogic y GyroMaster, GyroTracer, etc.

La medición de trayectoria en minería tiene un gran impacto, dado que, si hay un error en el registro de datos entregados, puede llevar a la pérdida del objetivo mineral, resultando en estimaciones imprecisas de las reservas disponibles, lo que conlleva a decisiones erróneas sobre la viabilidad económica que posee el proyecto, afectando tanto en la inversión como en la planificación de la extracción mineralógica. Además, la falta de control de calidad en las mediciones de trayectoria puede incrementar el margen de error en las interpretaciones geológicas y la gestión de recursos para el proyecto a ejecutar, por lo tanto, es sumamente importante que una medición de trayectoria sea ejecutada de una manera segura, precisa y correcta para evitar este tipo de errores en un futuro.

A continuación, en la Figura 1-3, se representa lo que es una medición de trayectoria esquemáticamente, tomando en cuenta los parámetros básicos en la medición, en donde, la inclinación y el azimut son medidos respecto a la horizontal, los cuales, son negativos cuando el pozo va direccionado hacia abajo y positivo si va hacia arriba.



Fuente: Esquema extraído de: https://www.researchgate.net/figure/Basic-parameters-in-borehole-surveying-in-UG-mining-dip-and-azimuth-are-measured-with_fig1_370426108

Figura 1-3: Representación tridimensional de la trayectoria de un sondaje.

Sumado a ello, existen varios procedimientos de trabajo que se deben cumplir bajo normativa para poder efectuar la labor de manera correcta y sobre todo segura, los cuales, en este caso, como empresa Q.S.S son los siguientes establecidos:

1.5. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

1.5.1. Ingreso al área:

- Una vez que la unidad de medición ha llegado a la plataforma de sondaje, donde efectuará el proceso de medición de trayectoria, la camioneta de Q.S.S., deberá estacionarse en el lugar habilitado fuera de la plataforma (estacionamientos designados), hasta que el encargado del área autorice el posicionamiento del equipo dentro de la plataforma. En caso de medición con cable de sonda, el operador deberá entrar hasta la plataforma de la empresa perforadora bajo previa autorización.

- Deberá realizar ART en la entrada de plataforma, determinando condiciones de trabajo y pudiendo realizar ART cruzada.
- Teniendo la autorización de ingreso por parte del encargado de área, el operador de Q.S.S., deberá posicionar la camioneta en un lugar definitivo de medición, quien realizará las indicaciones en las maniobras de retroceso, asegurando la no exposición del personal a la línea de fuego de la maniobra; una vez instalado en la posición final, se mantendrá el motor encendido durante la tarea para energizar el equipo de medición, acciona el freno de mano e instala 4 cuñas en las ruedas traseras y traba volantes (Figura 1-4).



Fuente: Fotografía tomada por personal Q.S.S. en faena minera.

Figura 1-4: Ejemplo de posicionamiento de camioneta para realización de medición de trayectoria.

- Será requerido que el operador perforista, cuente con una barra (hilo macho) a una altura aproximada de 1,5 metros medidos desde el suelo aproximadamente, o en su defecto desde el collar; realizando este paso, se facilitará la instalación del tapón y polea que Q.S.S. requiere para instalar el cable del huinche de la unidad de medición (descrito más abajo).

1.5.2 Armado de equipo:

- Una vez posicionado totalmente el equipo, el supervisor de medición deberá segregarse el área donde se posiciona el cable, utilizando para esto cadenas plásticas y conos; una vez realizada esta acción, supervisor de Q.S.S deberá instalar barras Cooper del equipo.
- Una vez realizado el bloqueo, ART y segregación, se hará instalación el tapón elevador en el hilo de la barra (instalada en el equipo de perforación), para luego proceder instalar grillete, el cual asegurará la instalación de la polea para pasar el cable del huinche, el operador perforista subirá el Chuck hasta que el supervisor operador de medición lo estime conveniente (Figura 1-5).



Fuente: Fotografía tomada en Codelco Andina el 15/01/2025, postura de sondaje Soletanche Bachy en Aire-Reverso.

Figura 1-5: Polea instalada junto con tapón y grillete.

1.5.3. Bloqueo de equipo de perforación:

- Operador perforista, deberá detener el equipo de perforación realizando el aislamiento, instalando equipo de bloqueo en corta corriente de sonda, y verificando energía cero.
- Una vez que el equipo sonda se encuentra aislado y bloqueado por el operador perforista, el personal Q.S.S deberá proceder a bloquear el corta corrientes de sonda, dejando registro en manifold o bitácora correspondiente.

1.5.4. Medición de pozo con camioneta Q.S.S.:

- Supervisor operador de medición deberá proceder a introducir el giroscopio dentro de la barra de perforación (collar), ajustando el giroscopio a su nivel para dar inicio a la bajada del giroscopio, el supervisor operador de medición deberá energizar el huinche a partir del sistema de energización implementado en vehículo de medición (inversor). Se deberá encender el giroscopio y se esperará hasta que el software indique la iniciación de la medición.
- Finalizada la etapa anterior, se iniciará la primera medición.
- Se bajará el giroscopio a través las barras de perforación con apoyo del huinche, realizando mediciones por intervalos según lo requiera el cliente. Si se está operando con el GyroMaster, las mediciones se harán deteniendo el huinche en los intervalos que el cliente lo requiera. La detención se realizará a través del potenciómetro de velocidad ubicado en el panel de control y accionando el botón de “PARAR” en el panel de control, en donde, en las Figuras 1-6 y 1-7 se demuestran el equipamiento el cual Q.S.S. opera con camioneta junto a huinche, se observa el panel de control, huinche de aproximadamente 1200 metros de largo del cable, logger para adquirir datos sobre cantidad de metros recorridos y computador, en donde, se va controlando la velocidad en m/min de bajada y subida de cable.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada en oficina Q.S.S ubicada en Quebrada Herrera el 24/02/2025.

Figura 1-6: Equipamiento para camioneta Q.S.S.



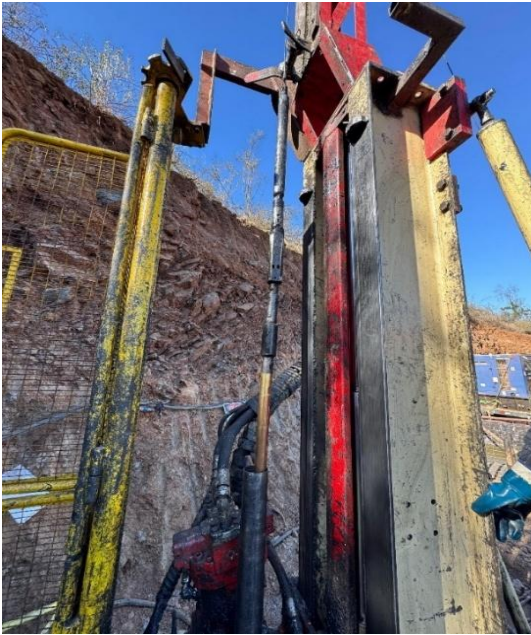
Fuente: Oficina Q.S.S, fotografía de elaboración propia tomada el 24/02/2025.

Figura 1-7: Zona de trabajo para medición.

- La velocidad de huinche será ajustable (potenciómetro).
- Cuando la herramienta llega a aproximadamente 15 metros del fondo del pozo o del fondo de las barras (información entregada por mandante o empresa perforación), se detendrá el huinche. Una vez tomada la última medición en el fondo del pozo, se procederá a subir el equipo.

1.5.5. Medición de pozo sin camioneta Q.S.S.:

- La operación se repite al igual que la medición en camioneta, con la diferencia que el equipo se adapta con un pino instalado en la parte posterior del equipo de medición con el pescante de la sonda (Figuras 1-8 y 1-9).



Fuente: Minera Las Cenizas, fotografía tomada el 21/02/2025 por personal Q.S.S.

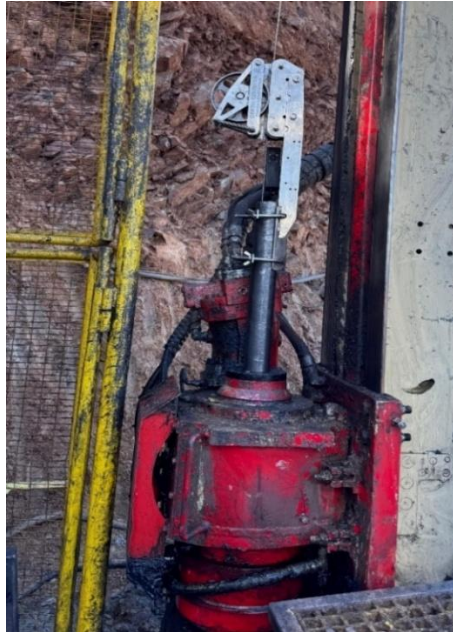
Figura 1-8: Equipo de medición enganchado con el pescante de la sonda.



Fuente: Fotografía de elaboración propia tomada el 21/02/2025 en Minera Las Cenizas.

Figura 1-9: Pino.

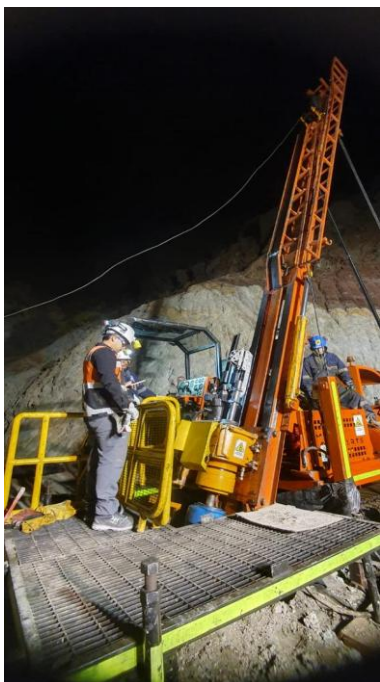
- El operador de medición instalará cuenta metros sobre el Chuck en una zona donde pueda pasar el cable de la sonda, para así poder generar la cuenta de los metros (Figura 1-10).



Fuente: Fotografía tomada el 23/03/2025 en Minera Las Cenizas.

Figura 1-10: Instalación de cuenta metros sobre el Chuck.

- El operador de medición deberá colocarse en zona segura de la sonda para poder alejarse ante cualquier imprevisto que pueda ocurrir y así preservar el autocuidado.
- Una vez que el cuenta metros esté instalado, y el equipo con el pescante, el perforista comenzará a bajar el equipo de manera constante hasta el fondo del sondaje. Una vez llegado al 10m del fondo, deberá parar, realizar una espera de 3 minutos y luego volver a subir sacando el equipo. Con esto se registra la medición de trayectoria (Figura 1-11).



Fuente: Fotografía tomada por personal Q.S.S. , postura de sondaje empresa RyO Ingeniería, Alicahue.

Figura 1-11: Operador realizando medición con cuenta metros.

- El operador de medición irá avisando al perforista la profundidad del Sondaje, cuando debe parar y sacar equipo, para revisar que la data obtenida por la medición este lista para poder ser entregada y analizada.
- Una vez terminada la operación, el operador de medición deberá retirar equipo y retirarse de la plataforma.

1.5.6. Retiro de giroscopio y desarme.

- Ya terminada la medición del pozo, se procederá a des energizar el giroscopio, posteriormente se retirará desde el collar del pozo y se desacoplará del cabezal para guardarlo en la unidad de medición.
- Personal de Q.S.S SpA procederá a retirar bloqueos del equipo sonda, para que el operador perforista realice la misma acción.

- Operador perforista, procederá a bajar la barra para llevar el tapón elevador y la polea a una altura no superior a 1,5 metros medidos desde el suelo aproximados para retirar cable del huinche, polea y tapón y realizar la recolección del cable (tramo que va desde el huinche al cabezal).
- Una vez almacenados todos los equipos dentro del vehículo, se realizará el retiro de conos del área de trabajo y del entorno de la trayectoria del cable.

1.5.7. Retiro del área:

- Una vez retirados todos los elementos pertenecientes a Q.S.S., se procederá a realizar devolución del área de trabajo al operador del equipo sonda.
- El operador de medición debe dejar registro de la labor realizada en un manifold o bitácora que posee el encargado de la zona, en donde, esa información debe estar incluida la labor a realizar, un estimado de tiempo invertido en la medición y dejar alguna acotación en caso de que haya habido algún percance en el transcurso de esta.
- Una vez finalizado el registro de la trayectoria, el Supervisor operador de medición enviará los datos de la medición por correo electrónico a la clientela que solicita la información requerida.

**CAPÍTULO 2: INSTRUMENTOS DE MEDICION, COSTO Y REALIZACION DE
MEDICION DE TRAYECTORIA.**

2.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

2.1.1. GyroMaster SPT:

- Es un giroscopio que posee un buscador de norte geográfico con la más alta tecnología presente en la industria minera, y por ende, la medición de trayectoria más rápida de la industria hoy en día (Figura 2-1).
- La planificación de las operaciones mineras requiere herramientas precisas de medición de trayectoria que aseguren el control de calidad. Con millones de dólares invertidos en una operación minera, incluso con el error más pequeño en la precisión de una herramienta de medición de trayectoria de pozos, puede generar pérdidas de mucho tiempo operativo y cantidad significativa de dinero. En la industria de la perforación los errores cuestan más que el dinero; pueden causar un daño significativo a la reputación de una empresa o, lo que es más importante, al medio ambiente.
- La mayoría de los contratistas de perforación confían en un instrumento de medición de pozos para asegurarse que la perforación sea lo más precisa posible, sin embargo, todavía una gran cantidad utiliza tecnología de medición desactualizada o de baja calidad. Al comprender los beneficios de la última tecnología en giroscopios buscadores de norte, los contratistas de perforación pueden producir mejores resultados y aumentar las ganancias.
- La tecnología patentada Navibore de SPT es fundamental en su capacidad para producir datos de medición altamente precisos. Capaz de realizar mediciones a altas velocidades sin necesidad de detenerse, esta tecnología de fondo de pozo permite que el modo continuo GyroMaster registre puntos de datos a cada cm. Este tipo de precisión es crucial para producir datos de medición definidos para las operaciones mineras.

- Los instrumentos de medición orientados al norte de SPT se basan en el Norte Verdadero, por lo que no hay necesidad de declinaciones al estar dirigidos a una dirección de referencia absoluta.
- La tecnología Navibore le da al GyroMaster la capacidad de corregirse a lo largo de un recorrido de medición de un pozo, eliminando toda posibilidad de deriva. Esta herramienta no necesita el collar azimuth, lo que lo convierte en una medida absoluta sin la dependencia del operador.
- El GyroMaster puede ser utilizado en terrenos con magnetismo, ya que mide la proyección de la velocidad angular de la Tierra en su eje de rotación
- El costo asociado a este giroscopio en el mercado actual es aproximadamente \$180.000 USD.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada en sucursal central Q.S.S. el 17/03/2025.

Figura 2-1: GyroMaster perteneciente a Q.S.S.

2.1.2. GyroLogic SPT:

- Al igual que el GyroMaster, este giroscopio también posee un buscador de norte, pero, a diferencia del GyroMaster, el GyroLogic Evo es una herramienta todo-en-uno (todo en un solo barril de presión), es decir, posee tanto el cuerpo del giroscopio como la batería en una sola pieza (Figura 2-2), en cambio, GyroMaster posee 2 partes, en donde posee la conexión donde va el cabezal se encuentra la batería que energiza y otorga funcionamiento al giroscopio, y la segunda es donde va integrado el giroscopio del instrumento.
- GyroLogic es una herramienta robusta, fiable y completa que prioriza su seguridad al permitir el funcionamiento remoto a través de una conexión Bluetooth. Compacto y ligero con tan solo 35 mm de diámetro.
- Ofrece versatilidad al permitir acoplar centralizadores que se adaptan a distintos diámetros, características que posee tanto GyroMaster como GyroLogic.
- Gracias a las ventajas de la tecnología giroscópica de estado sólido, el GyroLogic Evo ofrece precisión, durabilidad y fiabilidad, optimizando así sus operaciones de prospección. También, GyroLogic Evo es capaz de generar informes completos de QA/QC y exportarlos en formatos ampliamente utilizados como PDF, LAS, XLSX, CSV y DXF.
- El costo asociado para esta herramienta es de \$127.000 USD aproximadamente.



Fuente: Fotografía de elaboración propia tomada el 23/03/2025 en Minera Cenizas, Cabildo.

Figura 2-2: GyroLogic perteneciente a Q.S.S.

Todos estos datos otorgados son consultados directamente con el dueño de la empresa Quality Survey Services, quien se encarga de costear y comprar estos instrumentos, para cumplir con los altos estándares requeridos por cada uno de los proyectos en donde Q.S.S. se desempeña.

Los valores asociados a cada instrumento vienen respaldados en los anexos, donde se halla una factura hecha por SPT, indicando el valor de cada instrumento por separado, y el total monetario especificado.

Elegir la herramienta correcta de medición de pozos es crucial para el éxito de las operaciones mineras debido a que los datos proporcionados son esenciales para localizar la posición del núcleo en las coordenadas globales tridimensionales como un sistema absoluto. Un pequeño error en la precisión podría llevar a un cálculo incorrecto de las reservas naturales. Esto sería desastroso para la planificación de una mina, ya que el mineral podría considerarse roca estéril debido a una ubicación incorrecta.

A continuación, a modo de comparación se incluirá un cuadro en donde se explicará cada una de las características de cada instrumento de medición:

Característica	GyroMaster™	GyroLogic™ Evo
Fabricante / Tecnología	North-seeking solid-state gyro con tecnología Navibore™. Precisión alta, mide azimuth incluso en pozos verticales y zonas magnéticas.	Herramienta todo en uno (pressure barrel) ideal para ambientes magnéticos o mediante wireline.
Modo de medición	Continuo, multishot, single-shot; registra puntos cada centímetro.	Modo continuo con intervalos de centímetros.
Precisión (Azimut / Inclinación)	Azimut: ~0.16°; Inclinación: ~0.05°.	Azimut: ~0.16°; Inclinación: ~0.05°.
Exactitud Posicional Típica	<0.1 % de la profundidad total medida.	~0.2 %.
Dimensiones / Tamaño	Diámetro: 42 mm; Largo: ~1844 mm; Peso: ~8 kg.	Diámetro: ~35 mm; Largo: ~1010 mm; Peso: ~4.5 kg.
Ambientes	Funciona sin verse afectado por campos magnéticos; desde vertical a horizontal.	Ideal para ambientes con interferencia magnética; también en perfiles inclinados.
QA/QC y Software	Reportes automáticos, integración con SmartCloud™, control de calidad en tiempo real.	Genera informes PDF/Excel/CSV/LAS/DXF; comparte datos vía Bluetooth y SmartCloud.

Peso y maniobrabilidad	Más pesado (8 kg), robusto para operaciones exigentes.	Más ligero (4.5 kg), más fácil de manipular y transportar.
-------------------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia en base a datos entregados por SPT (2025).

Tabla 2-1: Comparativa técnica entre GyroMaster y GyroLogic.

Tomando en cuenta las características específicas de cada instrumento, se interpreta que ambos instrumentos son capaces de realizar la misma labor de la medición de trayectoria, ya que ambos poseen una entrega de datos con una excelente precisión, en donde, son aptos para ser utilizados en zonas de extrema condición climática, ya que el material por lo que están compuestos son de muy alta resistencia a golpes y vibraciones; sin embargo, GyroMaster a diferencia de GyroLogic posee la capacidad de calcular de manera directa el azimut de un sondaje, por lo cual, para que GyroLogic obtenga esa información, debe tener a disposición un alineador de plataformas (Gyro RigAligner) que le permita facilitar la entrega de datos referentes al azimut de un sondaje.

En términos de uso laboral, para la comodidad del trabajador u operador de medición, GyroLogic para sondajes de una extensión corta resulta mucho más maniobrable para poder realizar la labor, debido a que es un equipo liviano comparado al GyroMaster y gracias a su modo de medición, resulta más fácil y rápido poder medir un sondaje corto, en cambio, con el instrumento GyroMaster es más complicado para el trabajador debido a que es un equipo mucho más pesado, a comparación de GyroLogic, pesa el doble que este instrumento, por lo tanto, su maniobrabilidad es más compleja debido a que es un equipo más robusto y pesado; no obstante, para sondajes largos o más extensos, GyroMaster resulta un equipo excelente debido a su modo de medición multi shot, el cual, permite realizar una medición por lapsos mucho más largos y de medición continua, por lo que permite que sondajes extensos (aproximadamente desde los 500 metros hacia arriba) sean mucho más rápidos de poder medir y procesar datos, sumado a esto la alta precisión que también posee este equipo.

En conclusión, GyroLogic es un equipo que está recomendado para sondajes cortos o en áreas donde la logística y la maniobrabilidad sean críticas y GyroMaster está recomendado para ser utilizado en sondajes largos y trabajos que requieran adquisición de datos de manera continua y con una alta resolución.

2.2. MEDICION DE TRAYECTORIA EN CODELCO ANDINA

2.2.1. CODELCO DIVISION ANDINA.

División Andina se ubica a más de 3.000 metros de altura sobre el nivel del mar en la Región de Valparaíso. Las operaciones combinan minería a rajo abierto y mina subterránea. En la actualidad esta división realiza la explotación de minerales en la mina subterránea de Río Blanco y en la mina a rajo abierto Sur Sur (Codelco, 2024).

División Andina opera el yacimiento Río Blanco, cuya riqueza es conocida desde 1920. Los intentos por iniciar su explotación no se concretaron hasta medio siglo después, en 1970, con la creación de la Compañía Minera Andina.

Ubicada a 80 kilómetros al noreste de Santiago, entre los 3.700 y 4.200 metros sobre el nivel de mar, la división tiene un método de explotación mixto (subterráneo y a rajo abierto) y cuenta con las reservas minerales más importantes de Codelco.

Codelco División Andina al año 2023 generó una producción de 165 KTMF de Cu.

A continuación, en la Figura 2-3 se representa de manera panorámica la División de Codelco Andina, en especial lo que consta el yacimiento a rajo abierto, enfocado en la Fase 6, lugar el cual se hará la medición de trayectoria.



Fuente: Elaboración propia, fotografía tomada en mirador de Codelco Andina Ubicación Fase 6.

Figura 2-3: Codelco División Andina.

2.2.2. SERVICIO DE MEDICIÓN DE TRAYECTORIA.

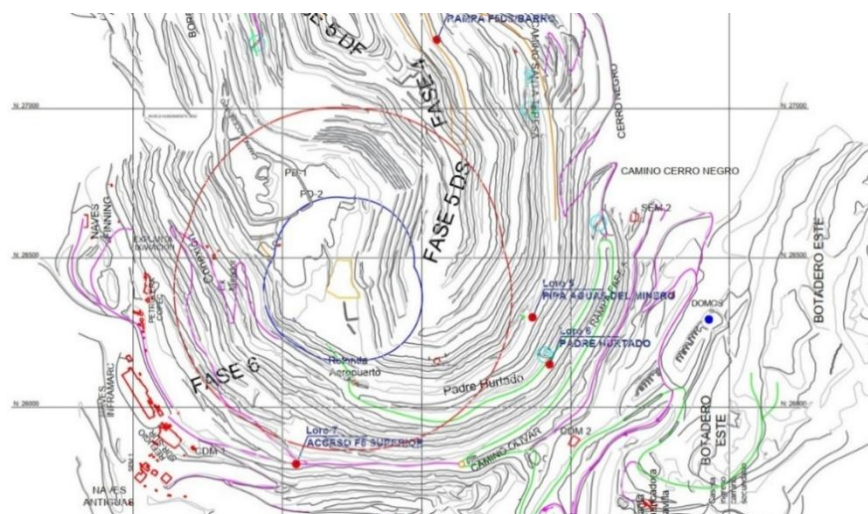
Q.S.S. (Quality Survey Services) es solicitado para realizar una medición de trayectoria a Codelco División Andina en la zona de minería a rajo abierto, específicamente en la ubicación llamada “FASE 6”, lugar que actualmente se encuentra en plena producción y, en donde, se solicita hacer una medición de trayectoria a un sondaje de 250 metros en un sondaje de aire – reverso (Figura 2-4).

En la Figura 2-5 y 2-6, se representa la Fase 6 en distintas formas, en donde, la Figura 2-5 representa la ubicación de la división de Codelco Andina geográficamente, en donde se puede apreciar a la Fase 6, esta imagen es utilizada para saber de manera específica la zona de afección que abarca una tronadura, tomando en cuenta el rango de la explosión de mineral, para la Figura 2-6, es una fotografía tomada desde un ángulo más terrenal, donde no había postura de sondaje debido a una pronta tronadura, por lo cual, tanto la maquinaria de perforación junto con todo el personal bajo normativa de seguridad tuvo que ser retirado de la zona, debido a que la tronadura se hizo muy cercana a la postura.



Fuente: Personal de medición de sondajes ubicados en Fase 6, Codelco Andina, el 09/03/2025.

Figura 2-4: Camioneta Q.S.S. realizando medición en sondaje Aire – Reverso (RC).



Fuente: Cristian Peña (Supervisor Soletanche Bachy).

Figura 2-5: Ubicación geográfica fase 6 Codelco División Andina.



Fuente: Fotografía de elaboración propia tomada el 28/04/2025.

Figura 2-6: Fase 6 Codelco División Andina.

Una vez ubicados dentro de la zona del sondaje, se procede a realizar maniobra de estacionamiento con la camioneta Q.S.S. acuatada en una zona de seguridad propuesta por la empresa de sondaje, en este caso llamada Soletanche Bachy, para su posterior ingreso al área bajo previa autorización del supervisor de la zona. Entrando al área del sondaje, uno de los ayudantes de la sonda procede a realizar la charla de seguridad obligatoria bajo normativa para establecer los peligros y riesgos presentes en la zona al momento de ingresar al área. Una vez escuchado y tomando en cuenta todos los riesgos presentes, se procede a firmar el registro de la presencia del personal, en donde se oficializa el ingreso bajo autorización a la zona del sondaje a medir.

Se hacen las respectivas consultas de las condiciones que presenta el sondaje al operador de la maquinaria y referencias del sondaje (Inclinación y Azimut), para así tener en cuenta cuanto se debe llegar a medir el sondaje, ya que el equipo de medición debe tener un aproximado de espacio antes de llegar al fondo del pozo para no golpear el equipo, ya que a pesar de ser un equipo hecho para este tipo de condiciones, el hecho de que el equipo se golpee de manera grave, puede presentar una falla en la calibración del equipo y así el giroscopio arroje data incorrecta, caso que para Q.S.S. como empresa, es una falta grave.

Fuente: ART Codelco Andina.

El sondaje de Aire – reverso posee un largo de 250 metros, con una referencia de - 80° de inclinación y 240° de azimut. La medición de trayectoria tuvo un periodo de tiempo de aproximadamente 1 hora, en donde se toma en cuenta desde la llegada a la plataforma del sondaje, el armado del equipo, inicio de medición, fin de medición y abandono de la plataforma. Las horas por considerar fueron desde las 17:30 a 18:30 hrs.

Se realiza la medición restando 10 metros al fondo del sondaje para establecer la seguridad del giroscopio debido a que personal de perforación levanta una barra que mide 6 metros de largo, esto se hace para poder conectar el tapón en la boca de la barra, y así en conjunto adicionar la polea junto con el cable, para posteriormente enviar el equipo conectado junto con el cabezal del cable winch por dentro de las barras del sondaje, por lo tanto, se realiza esta acción de medir antes para evitar golpes que puedan afectar al equipo y pueda arrojar datos erróneos.

Para las mediciones que son realizadas sin el uso de camioneta, se debe pedir al operador de la maquina perforadora que deje dentro del fondo del sondaje un tubo interior, el cual va ubicado dentro de las barras del sondaje, esto sirve para asegurar el instrumento al momento de que este en un posible caso pueda quedarse abajo del fondo del sondaje debido a algún incidente que se vea implicada la máquina de perforación, ya sea por ejemplo que el cable de la misma maquina perforadora se haya cortado y quede el equipo abajo dentro de las barras del sondaje, como también que el equipo de medición se haya soltado del pescante debido a una avería en la conexión de este mismo, de esta forma, el instrumento puede ser rescatado sacando todas las barras del sondaje y así evitar que este quede en el mismo fondo y así haya una mayor complicación de rescate, o peor aún, que el equipo no se pueda recuperar y se quede abajo del fondo del sondaje.

Una vez finalizado el trabajo, se debe enviar reporte vía correo electrónico al cliente (CODELCO DIVISION ANDINA), con copia a jefatura de la empresa Q.S.S. estableciendo todos los datos anteriormente mencionados y junto con ello la medición y el equipo a utilizar para realizarla. Se entrega en dos formatos, uno en Excel XLSX y en PDF poniendo como título el nombre del sondaje como tal (6423).

A modo de ejemplo, en la imagen que se muestra a continuación representa el formato el cual los reportes son enviados para Codelco Andina, cabe destacar que este formato es únicamente para esta empresa, para otros proyectos, siempre van a ir adecuándose distintas formas para enviar los sondeos a medida que la empresa vaya requiriendo bajo contrato, dentro de estos reportes van ubicados los metros del sondeo a medir junto con todas las coordenadas requeridas por geología.

Una vez obtenidos los datos, en el siguiente capítulo se hará un análisis estableciendo el porcentaje de desviación que tuvo este sondeo en particular, para esto, se necesitarán los datos necesarios, los cuales serán entregados mediante el reporte oficial del sondeo “6423” ubicado en la sección de anexos, en la tabla, se indicaran los datos a utilizar, los cuales se definen como:

- Largo del sondeo (Profundidad): 250 metros, los cuales fueron medidos 240 metros.
- Inclinación (Referencial): Se indica que es un sondeo que tiene -80° de inclinación (dato entregado por topografía).
- Azimut (Referencial): Se indica que el pozo posee 240° de Azimut.

Los datos entregados son los necesarios para saber en donde el sondeo está ubicado para iniciar la medición de trayectoria, una vez hecha la medición, el reporte que entrega el instrumento de medición (GyroMaster), indicará mediante una tabla que definirá numéricamente la trayectoria del sondeo y mediante el largo del sondeo cuánto este mismo se va desviando, esto nos ayuda a visualizar si hay algún cambio muy drástico en los grados de desviación, tanto de inclinación como de azimut, sea debido a alguna falla en la estructura rocosa de la zona en donde se está perforando.

CAPITULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1. FÓRMULA DE DESVIACIÓN DE SONDAJE

Para calcular el porcentaje de desviación en sondajes, se debe determinar la desviación real del sondaje con respecto a la trayectoria planificada y luego expresar esa desviación como un porcentaje del largo total del sondaje. Este cálculo ayuda a evaluar la precisión de la perforación y a tomar medidas correctivas si es necesario, caso que es bastante útil, debido a que hay casos en donde empresas de perforación solicitan mediciones a mitad del sondaje perforado para ir analizando el sondaje y a su vez poder corregir si es que hay alguna desviación significativa que provoque una mala planificación en base a lo esperado por la empresa de perforación.

La importancia de este cálculo está presente en muchos aspectos, tal como es el control de calidad, a través del análisis en base a la precisión de la perforación y a su vez el poder corregir errores en el proceso, diseño del sondaje, debido a que una desviación puede afectar a la ubicación de los objetivos propuestos en el sondaje y una futura mala interpretación de los datos obtenidos, evaluación de costos, ya que una mala perforación aumenta los costos de perforación debido a las correcciones y posibles perforaciones adicionales y sobre todo, la seguridad, ya que una desviación de sondaje excesiva puede provocar un peligro a la seguridad de la operación, ya que hay muchos casos en donde el sondaje planificado por la empresa mandante, por ejemplo, está ubicado en lugares donde hay presencia de chimeneas, como también puede comprometer con otras operaciones mineras, por lo tanto, es necesario que el sondaje sea preciso y vaya lo más guiado posible hacia lo planeado (API RP 78, 2022).

Con los resultados obtenidos en base a la medición realizada, se puede obtener y saber el porcentaje de desviación de trayectoria, lo cual, se obtiene mediante una fórmula que se define como:

$$R = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta C^2}$$

$$\% \text{Desviación} = \frac{R}{\text{Profundidad medida del sondaje}}$$

En donde:

- ΔN^2 : Diferencia entre la coordenada Norte programada al final del sondeo y la coordenada Norte final, elevado al cuadrado.
- ΔE^2 : Diferencia entre la coordenada Este programada al final del sondeo y la coordenada Este final, elevado al cuadrado.
- ΔC^2 : Diferencia entre la Cota programada al final del sondeo y la Cota final, elevado al cuadrado.
- R: Desviación en metros.

El término “coordenada programada al final del sondeo”, es definido como la coordenada que es otorgada por la empresa cliente, es decir, a la coordenada que se espera llegar al final del sondeo.

El término “coordenada final”, corresponde a la coordenada que nos entrega el equipo de medición una vez utilizado para medir el sondeo, se toma la última coordenada que entrega el equipo, ya que esta es la que pertenece al final del sondeo medido.

Tomando en cuenta los datos obtenidos por el sondeo 6423, podemos recopilar una cantidad de datos, las cuales son:

- Coordenada Norte (inicial): 26,942
- Coordenada Este (inicial): 23,852
- Cota (inicial): 3,580

Estos datos corresponden a las coordenadas que fueron obtenidas mediante personal de topografía, los cuales se utilizarán para poder llegar al porcentaje de desviación del sondeo.

3.1.1. Cálculo de Distancia Horizontal Acumulada de sondaje (DH).

En base a la medición realizada, los datos obtenidos según lo que arroja el equipo de medición, son los siguientes:

- Coordenada Norte (final): -0,797
- Coordenada Este (final): -5,529
- Cota (final): -232,933

Teniendo estos datos en cuenta, primero para poder llegar con el resultado, se debe calcular la Distancia Horizontal Acumulada del sondaje (DH), que se define como:

- $DH = Profundidad\ medida \times \cos\left(\frac{Inclinacion\ sondaje \times \pi}{180}\right)$

Esta fórmula es utilizada para determinar con precisión la posición final del sondaje y comparar la trayectoria real con la planificada. Esta medición permite evaluar la precisión de la perforación y, si es necesario, ajustar la trayectoria para alcanzar los objetivos deseados por la empresa cliente.

Lo que se traduce a:

- $DH = 240 \times \cos\left(\frac{-80^\circ \times \pi}{180}\right)$

Obteniendo:

- $DH = 240 \times \cos\left(\frac{-251,3274123}{180}\right)$
- $DH = 240 \times \cos(-1,396263402)$
- $DH = 240 \times 0,1736481773$
- $DH = 41,67556.$

3.1.2. Cálculo de Coordenadas programadas al final del sondeaje.

Una vez teniendo la Distancia Horizontal Acumulada del sondeaje, se puede avanzar para adquirir el dato de las coordenadas programadas al final del sondeaje, los cuales para llegar a ellos se debe aplicar el siguiente calculo:

- Coordenada Norte programada final:

$$DH \times \cos\left(\frac{Azimut \times \pi}{180}\right) + \text{Coordenada Norte (otorgada por topografo)}$$

- Coordenada Este programada final:

$$DH \times \sin\left(\frac{Azimut \times \pi}{180}\right) + \text{Coordenada Este (otorgada por topografo)}$$

- Cota programada final:

$$\text{Profundidad medida} \times \sin\left(\frac{Inclinacion \times \pi}{180}\right) + \text{Cota (otorgada por topografo)}$$

Esta fórmula se utiliza para verificar y asegurar que el pozo perforado alcance el objetivo deseado con la precisión requerida, considerando las desviaciones inevitables durante la perforación.

En donde:

- Coordenada Norte programada final:

$$41,67556 \times \cos\left(\frac{240 \times \pi}{180}\right) + 26,942 = 6,104$$

- Coordenada Este programada final:

$$41,67556 \times \sin\left(\frac{240 \times \pi}{180}\right) + 23,852 = -12,24$$

- Cota programada final:

$$240 \times \sin\left(\frac{-80 \times \pi}{180}\right) + 3,580 = -232,774$$

3.1.3. Cálculo de Diferencia entre Coordenada Programada al final del sondaje con la Coordenada final.

Una vez obtenidos estos resultados, los cuales corresponden a las coordenadas programadas al final del sondaje, se procede a calcular la diferencia entre la coordenada programada al final del sondaje con la coordenada final, esto se realiza para evaluar la precisión del trabajo de perforación y verificar que el pozo se haya realizado según lo planeado, la cual se expresa como:

- I. $\Delta N = \text{Coordenada Norte Programada final} - \text{Coordenada Norte final}$
- II. $\Delta E = \text{Coordenada Este Programada final} - \text{Coordenada Este final}$
- III. $\Delta C = \text{Cota Programada final} - \text{Cota final}$

Retribuyendo a las definiciones de cálculos anteriores, resulta:

- I. $\Delta N = 6,104 - (-0,797) = 6,901$
- II. $\Delta E = -12,24 - (-5,529) = -6,711$
- III. $\Delta C = -232,774 - (-232,933) = 0,159$

3.1.4. Cálculo de porcentaje de desviación.

Ya teniendo todos los datos necesarios, es posible resolver el porcentaje de desviación utilizando la formula explicada al inicio del capítulo 3, resultando:

- $R = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta C^2}$

$$\sqrt{(6,901)^2 + (-6,711)^2 + (0,159)^2}$$

$$R = 9,627 \text{ (desviación en metros)}$$

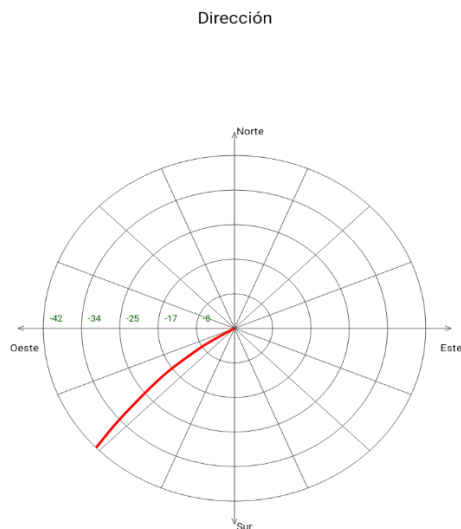
- $\% \text{ Desviación final} = \frac{R}{\text{Profundidad medida del sondaje}} \times 100$

$$\% \text{ Desviación final} = \frac{9,627}{240} \times 100 = 4,01\%$$

3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base a los resultados obtenidos, se interpreta que en este caso en específico, el sondaje presento una desviación de un 4,01%, en donde, en la sección correspondiente a la inclinación del sondaje, tuvo una diferencia de $0,02^\circ$, cuyo caso presenta una excelente inclinación, sin embargo, al tomar en cuenta la sección de la Azimut del sondaje, este presenta una diferencia de $24,12^\circ$, lo que significa una desviación bastante significativa y de una característica bastante inusual, ya que, por lo general, los sondajes tienden normalmente a desviarse hacia los grados que van direccionados hacia los 360° , o más bien, hacia la derecha, y en este caso en particular, el sondaje se desvió hacia la izquierda.

A continuación, en la Figura 3-1 está representada de manera gráfica el sondaje 6423, en donde se logra apreciar la desviación que tomó el sondaje una vez finalizado.



Fuente: Aplicación digital de GyroMaster SPT.

Figura 3-1: Representación gráfica de desviación de trayectoria presente en sondaje 6423.

Un punto importante por tomar en cuenta es que la desviación que se genera en la perforación de sondajes puede ser causada por diversos factores, los cuales son geológicos, mecánicos y operacionales, como es la inclinación del terreno, la heterogeneidad de las capas rocosas, la calidad de la herramienta de perforación y la experiencia del operador.

En minería, mantener la desviación dentro de rangos aceptables, generalmente entre un 3% a 5% dependiendo del tipo de perforación y las condiciones geológicas es crucial para optimizar costos, ya que desviaciones mayores pueden implicar la necesidad de realizar sondajes adicionales o redireccionar las perforaciones, lo que aumenta significativamente el gasto de perforación, transporte y logística. Asimismo, las desviaciones excesivas pueden generar riesgos de seguridad, especialmente si se interceptan áreas no planificadas o se compromete la estabilidad de galerías y taludes.

La desviación presente en el azimut ($24,12^\circ$) representa un valor superior al promedio esperado, lo que sugiere la influencia de factores geológicos adversos, como zonas de fracturamiento o variaciones en la dureza de la roca.

Este tipo de desviaciones pueden estar asociadas también a errores en la velocidad de penetración, desgaste de herramientas o problemas en la estabilización del martillo.

En el caso del sondaje 6423, este se vio afectado por zonas de fracturamiento de roca, ya que en la Fase 6, la cual corresponde a la ubicación en donde fue hecha la medición de trayectoria, era caracterizada por presentar muchas fallas de roca y presencia de muchas fracturas y quebraduras de roca, caso visiblemente notorio en las muestras de la máquina diamantina, en donde, se evidenciaba la magnitud de fracturas de la roca que se hallaban en el pórfido cuprífero, esta DDH trabajaba en conjunto con la RC o Aire - Reverso, la cual, corresponde a la máquina de perforación en donde se hizo la medición del 6423.

La razón por la cual se ejemplifica evidencias de otra maquinaria es debido a que la máquina perforadora de aire – reverso, a través de su funcionamiento, obtiene muestras minerales en forma de polvillo, entonces, es muy poco probable conocer las características

del yacimiento y la causa de la desviación mediante las muestras, lo que si puede funcionar y que si ha ocurrido, es que muchas veces la maquinaria tiende a atascarse en el martillo, lo cual impide que esta pueda perforar, caso que ocurre muchas veces cuando el terreno del yacimiento no tiene las condiciones óptimas para la perforación, esto se traduce a intentar desatascar el martillo utilizando el panel de control de la aire-reverso para soltar el martillo a través de subida y bajada de barras, los cuales provocan un movimiento que genera un pequeño golpeteo continuo del martillo para que se pueda liberar, una vez se logra liberar el martillo, se deben sacar barras hacia el exterior del sondaje y tratar de estabilizar el martillo para volver a posicionarlo y nuevamente introducir las barras de perforación para continuar perforando, acción que a medida que se vaya realizando, es altamente probable que el sondaje se desvíe.

En la Figura 3-2, la fotografía tomada por personal Q.S.S. se puede apreciar el nivel de fractura de roca que posee la zona en donde se estaba perforando, zona que estaban trabajando ambas máquinas perforadoras en conjunto, en donde, la roca prácticamente está sin una forma compacta, causa altamente probable por el cual el sondaje 6423 se vio afectado en su desviación.



Fuente: Fotografía tomada el 05/03/2025 en postura Soletanche Bachy.

Figura 3-2: Muestras de maquina diamantina en Fase 6, Codelco Andina.

Esto provoca en la perforación una desviación que es incontrolable, por lo tanto, para evitar una desviación muy prominente, se puede efectuar las siguientes acciones:

- La disminución de la velocidad de perforación del martillo, para que el terreno vaya cediendo a la perforación y así la herramienta pueda ejercer su función de una manera correcta sin provocar una fuerza excesiva ni tampoco pueda generar sobrecalentamiento de la maquinaria y que esta debido a esa causa pueda presentar fallas adicionales, ya que una perforación que sea hecha de manera apresurada, en las maquinarias de aire reverso, muchas veces tienen grandes desviaciones en sus sondajes, por lo tanto, es importante tener en cuenta esta acción.
- El cambio de posicionamiento del estabilizador del martillo a mitad del sondaje, para controlar la dirección del pozo de manera más precisa.
- Para sondajes extensos, es ideal el controlar mediante mediciones de trayectoria preventivas, de manera que tanto el operador de la perforación, como topografía, puedan asegurar que el sondaje vaya bien dirigido y no presente desviaciones que afecten al sondaje una vez terminado.
- Es necesario chequear preventivamente el estado de las herramientas de perforación, con sus respectivas mantenciones hechas a la cantidad de horas correspondientes de uso, para tener en constancia que las condiciones son las óptimas para perforar.

Un control adecuado de la trayectoria no solo depende de la precisión del instrumento, sino también de la correcta interpretación de los datos y de la implementación de acciones preventivas durante la perforación. La repetibilidad de las mediciones, es decir, la capacidad de obtener resultados consistentes en condiciones similares es un indicador clave de la confiabilidad del proceso.

Por eso, como solución a este caso, es necesario perforar un sondaje gemelo, para corroborar que la zona que está provocando la desviación presente en 6423 sea debido a la causa de fractura de rocas, ya que a pesar de que el pozo se encuentra dentro de los rangos de desviación, el grado de azimut es un indicador sumamente importante a la hora de ubicar un sondaje, y esto al igual que la inclinación debe ser controlado para lograr el objetivo de la empresa cliente y así, evitar gastos en logística, transporte, carguío de barras y sobre todo, la disminución en producción.

CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

Para concluir, la medición de trayectoria en sondaje lleva años en el mundo de la minería y su entrega de servicios para las grandes empresas que están en este rubro son de suma importancia debido a la gran influencia que esta tiene para ayudar a direccionar los sondajes, y así, de esta forma, contribuye a mejorar el análisis respecto a la ubicación sobre zonas geográficas que los equipos de medición entregan, gracias a esto, es posible especificar donde se halla el mineral y porcentaje de este que tenga mayor interés en base a lo que la empresa mandante este solicitando, como también en las empresas de perforación, el personal encargado de hacer la labor este perforando de manera correcta a través de las mediciones de trayectoria, ya que de esta forma se puede controlar la dirección de un sondaje mediante mediciones que otorguen datos de ubicación del pozo y así pueden ir analizando y guiando el sondaje hacia la dirección indicada por el cliente, sumado a esto, la labor será ejecutada con seguridad y precisión.

Junto con esto, las ventajas para todo esto, es el menor gasto de implementos en todo lo que conlleva la tronadura debido a decisiones tomadas correctamente, como también para las empresas de perforación el tener el conocimiento de información adquirida en una medición de trayectoria les ayuda a poder establecer rangos y analizar la dirección de la perforación en base a lo que el cliente lo está solicitando, para así evitar hacer una perforación errónea y mal ubicada, ya que, si ese caso se genera, el cliente es capaz de solicitar una nueva perforación para así de esta manera el sondaje vaya lo más preciso posible, así para tener un mapeo correcto, razón sumamente importante, ya que una mala perforación afecta directamente a un defecto en la producción, explotación, y sobre todo, demoras en programaciones futuras para tronaduras dentro de lo que implica el yacimiento, sumado a esto también implica el generar gastos económicos adicionales, cosa que obviamente para cualquier empresa que solicita estos servicios no le favorece.

En el caso presente en esta tesis, una solución viable a una desviación de Azimut bastante prominente es hacer un sondaje gemelo, el cual, es un pozo que se realiza utilizando el mismo grado de inclinación y azimut del sondaje anteriormente perforado y va ubicado

justamente al lado de este. Esto se hace con el fin de corroborar información sobre las condiciones presentes en el sector donde se hizo la perforación, para verificar si efectivamente la falla o fractura ubicada en esa zona está afectando en la desviación del sondaje.

También hay casos en donde en la zona donde se hace la perforación se efectúan tronaduras que afectan este lugar, lo que condiciona al personal y muchas veces a toda la maquinaria instalada, por lo tanto, como orden de la mina, tanto personal como la maquina de perforación, deben ser retirados de la zona debido a reglamentos de seguridad y prevención de riesgos, esta acción muchas veces afecta a la dirección del sondaje, ya que hay que reinstalar la máquina de perforación una vez hecha la tronadura, y eso provoca que el ángulo de inclinación y azimut de la maquina se desvíen debido a la vibración que provoca una tronadura, la mal colocación de la maquina en la postura del sondaje, etc.

Bajo todas estas condicionantes, es necesario hacer un sondaje gemelo para verificar este caso, dado a que este sondaje presentó una desviación gradual en el azimut bastante considerable, factor que es muy raro en temas de perforación, ya que, bajo condiciones normales o dentro de los parámetros que generalmente Q.S.S. ejecuta su labor, esto no suele ocurrir.

BIBLIOGRAFÍA

- Verasay Araya, Jobel Christopher, jefe de operaciones Quality Survey Services, implementación en uso de cálculos matemáticos Capítulo 3 “Análisis de resultados”.
- Sin autor, obtención de información en base a faena Codelco Andina, Capítulo 2: “Instrumentos de medición, costo y Realización de Medición de Trayectoria”. Fuente sacada por: [Andina | CODELCO - Corporación Nacional del Cobre, Chile](#).
- Peña Cristian, Supervisor de turno Soletanche Bachy, imágenes de faena Codelco andina y ubicación geográfica.
- Stockholm Precision Tools, información referente a equipos de medición en Capítulo 1 “Medición de Trayectoria”, [br-gyrologic_evo-es.pdf](#), [GyroMaster™ | Giroscopio Buscador Norte | SPT](#).
- Sin autor, información referente a la minería en Chile, capítulo 1 “Medición de Trayectoria”. Fuente sacada de: [Minería en Chile – Consejo Minero](#)
- Sin autor, información referente a la importancia de la medición de trayectoria en la minería. Fuente sacada de : [¿Qué causa la desviación del orificio en la perforación? - Documento de minería](#).
- Sin autor, información obtenida sobre datos importantes de la minería en Chile. Fuente sacada de: [Presentación de PowerPoint](#).
- Sin autor, obtención de imagen gráfica sobre la representación tridimensional de la medición de trayectoria en capítulo 1 “Medición de Trayectoria”. Fuente sacada por: [Basic parameters in borehole surveying in UG mining; dip and azimuth... | Download Scientific Diagram](#).
- Stockholm Precision Tools, especificaciones técnicas de GyroMaster. Recuperado de: [4-gyromaster-es.pdf](#).

ANEXOS

1.- Reporte Oficial sondaje 6423.



N° Pozo	6423
Proyecto	ANDINA
Ubicación	FASE 6
Pais	CHILE
Ciente	CODELCO ANDINA
	SOLETANCHE BACHY
Mandante	

Fecha	09-03-2025
Instrumento #	GYROLOGIC SPT
Operador	MARTIN ARANGUIZ GUERRA
Ref. 0	Ground
Metros a medir	240

Coordenadas Geograficas	ESTE	0,000
	NORTE	0,000
	COTA	0,000
Decl. Mag.	n/a	
Fondo del pozo	250	

Historial		
	Fecha	Tiempo
Llegada a plataforma	09-03-2025	17:30
Armar	09-03-2025	17:40
Inicio de medición	09-03-2025	17:45
Fin de medición y desarmar	09-03-2025	18:20
Salida desde Plataforma	09-03-2025	18:30
Información Adicional		
Tiempo de espera	☐ si ☒ no	
Problemas	☐ si ☒ no	

Datos a Interpretar
Profundidad: que fue Medida
Inclinación: del pozo vs. "horizontal/ vertical"
Deriva: "Magnetometrica/ norte geografico" azimuth del pozo
Altitud
Dirección del Este: Desplazamiento hacia el Este vs. el punto superior del pozo
Dirección del Norte: Desplazamiento hacia el Norte vs. el punto superior del pozo

PROFUNDIDAD (m)	INCLINACION (°)	AZIMUTH (°)	ESTE (m)	NORTE (m)	COTA (m)
0,00	-79,85	240,24	23,850	26,940	3,580
3,00	-79,81	240,26	23,389	26,677	0,627
6,00	-79,82	239,54	22,932	26,408	-2,325

9,00	-79,81	238,71	22,479	26,132	-5,278
12,00	-79,76	239,15	22,021	25,859	-8,230
15,00	-79,75	238,91	21,564	25,583	-11,182
18,00	-79,74	238,73	21,107	25,306	-14,134
21,00	-79,71	238,61	20,649	25,027	-17,086
24,00	-79,75	238,21	20,196	24,745	-20,038
27,00	-79,83	238,17	19,746	24,466	-22,991
30,00	-79,91	237,46	19,303	24,183	-25,945
33,00	-79,98	237,09	18,864	23,900	-28,899
36,00	-80,06	236,29	18,434	23,612	-31,854
39,00	-80,11	237,07	18,001	23,332	-34,809
42,00	-80,11	236,94	17,569	23,051	-37,765
45,00	-80,21	235,25	17,150	22,760	-40,721
48,00	-80,35	234,14	16,742	22,466	-43,679
51,00	-80,45	233,01	16,345	22,166	-46,637
54,00	-80,46	233,11	15,947	21,868	-49,596
57,00	-80,48	232,74	15,552	21,567	-52,554
60,00	-80,59	231,97	15,166	21,265	-55,514
63,00	-80,62	231,45	14,784	20,961	-58,474
66,00	-80,60	231,81	14,399	20,658	-61,434
69,00	-80,68	231,02	14,021	20,352	-64,394
72,00	-80,73	231,59	13,642	20,052	-67,355
75,00	-80,63	230,95	13,263	19,744	-70,315
78,00	-80,61	231,96	12,877	19,442	-73,275
81,00	-80,62	231,69	12,494	19,139	-76,234
84,00	-80,62	231,11	12,113	18,832	-79,194
87,00	-80,60	231,13	11,732	18,525	-82,154
90,00	-80,65	229,74	11,360	18,210	-85,114
93,00	-80,79	229,86	10,993	17,900	-88,076
96,00	-80,83	229,09	10,631	17,587	-91,037
99,00	-80,80	229,50	10,267	17,276	-93,999
102,00	-80,78	228,06	9,909	16,955	-96,960
105,00	-80,73	227,62	9,552	16,629	-99,921
108,00	-80,60	227,25	9,192	16,296	-102,880
111,00	-80,53	226,99	8,831	15,959	-105,840
114,00	-80,49	226,07	8,474	15,616	-108,798
117,00	-80,41	225,56	8,118	15,266	-111,756
120,00	-80,31	225,66	7,756	14,913	-114,714
123,00	-80,24	224,77	7,398	14,552	-117,670
126,00	-80,29	224,81	7,042	14,193	-120,627
129,00	-80,32	223,71	6,693	13,828	-123,584
132,00	-80,29	223,65	6,344	13,462	-126,541
135,00	-80,29	223,24	5,997	13,093	-129,498
138,00	-80,30	223,40	5,650	12,726	-132,456
141,00	-80,31	222,72	5,307	12,355	-135,413
144,00	-80,30	222,26	4,967	11,981	-138,370

147,00	-80,30	222,25	4,628	11,607	-141,327
150,00	-80,31	221,70	4,292	11,230	-144,284
153,00	-80,23	222,39	3,948	10,854	-147,241
156,00	-80,18	221,40	3,610	10,470	-150,197
159,00	-80,13	222,04	3,266	10,088	-153,152
162,00	-80,05	221,41	2,923	9,699	-156,107
165,00	-80,06	221,62	2,579	9,312	-159,062
168,00	-80,06	220,96	2,239	8,921	-162,017
171,00	-79,98	221,51	1,893	8,530	-164,971
174,00	-79,92	221,42	1,546	8,137	-167,925
177,00	-79,87	220,74	1,202	7,737	-170,878
180,00	-79,85	220,99	0,855	7,338	-173,831
183,00	-79,90	220,63	0,512	6,938	-176,785
186,00	-79,94	220,60	0,171	6,541	-179,739
189,00	-79,98	220,62	-0,168	6,144	-182,693
192,00	-80,04	220,32	-0,504	5,749	-185,648
195,00	-80,08	219,72	-0,834	5,351	-188,603
198,00	-80,11	219,35	-1,161	4,953	-191,558
201,00	-80,18	219,29	-1,485	4,557	-194,514
204,00	-80,23	218,88	-1,805	4,160	-197,471
207,00	-80,23	218,33	-2,120	3,761	-200,427
210,00	-80,23	218,40	-2,437	3,362	-203,384
213,00	-80,23	217,76	-2,748	2,960	-206,340
216,00	-80,23	217,03	-3,055	2,553	-209,297
219,00	-80,22	216,85	-3,361	2,145	-212,253
222,00	-80,14	217,30	-3,672	1,737	-215,209
225,00	-80,06	216,18	-3,978	1,319	-218,164
228,00	-80,01	216,64	-4,288	0,901	-221,118
231,00	-79,93	216,73	-4,602	0,481	-224,072
234,00	-79,86	216,12	-4,913	0,054	-227,025
237,00	-79,86	215,90	-5,223	-0,374	-229,978
240,00	-79,98	215,88	-5,529	-0,797	-232,933

2.- Factura de compra GyroMaster y GyroLogic.

- GyroMaster.



Invoice

Invoice no. 2021725

Invoice date
2022-12-29

Delivery address
QUALITY SURVEY SERVICES S.A.
ANTONIO VARAS 175 OFICINA 704
PROVIDENCIA, SANTIAGO
Chile

Invoice address
QUALITY SURVEY SERVICES S.A.
ANTONIO VARAS 175 OFICINA 704
PROVIDENCIA, SANTIAGO
Chile

Cust No. 201011469
Your Reference Cesar Sandoval
Your Order no. OC - 00064
Terms of Delivery Ex Works
Delivery Type By air
Your VAT no 76.219.158-K

Our Reference Orlando
Payment Condition
Due date 2022-12-29
Penalty Interest 0
Delivery date
Our Order no.

Item no	Designation	Amount Unit	ppu	Total
	Compra Gyromaster S/N 2167 nuevo con contador de metros y bateria	1 each	180 000,00	180 000,00

- GyroLogic.



Invoice

Invoice no. 2021670

Invoice date
2022-11-14

Delivery address
QUALITY SURVEY SERVICES S.A.
ANTONIO VARAS 175 OFICINA 704
PROVIDENCIA, SANTIAGO
Chile

Invoice address
QUALITY SURVEY SERVICES S.A.
ANTONIO VARAS 175 OFICINA 704
PROVIDENCIA, SANTIAGO
Chile

Cust No. 201011469
Your Reference Cesar Sandoval
Your Order no. OC - 00061
Terms of Delivery Ex Works
Delivery Type By air
Your VAT no 76.219.158-K

Our Reference Orlando
Payment Condition
Due date 2022-12-14
Penalty Interest 0
Delivery date
Our Order no.

Item no	Designation	Amount Unit	ppu	Total
	Gyrologic, Rig Aligner and Huinche 100m positivos	1.00 each	127 000,00	127 000,00