

Wilmer Arevalo Nima, Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocasas,
Jonathan Wilson Sancarranco Estela, Gohan Augusto Chiroque Gómez,
Lucerito Roxana Juárez Ramos

Fluidos de perforación y eficiencia minera

Aditivos petroleros y construcción de
capacidades organizacionales



Religación
Press

Wilmer Arevalo Nima, Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas,
Jonathan Wilson Sancarranco Estela, Gohan Augusto Chiroque Gómez,
Lucerito Roxana Juárez Ramos

Fluidos de perforación y eficiencia minera

*Aditivos petroleros y construcción de
capacidades organizacionales*

Religación Press
[Ideas desde el Sur Global]

*Drilling fluids and mining efficiency.
Oilfield additives and organizational capacity building*

*Fluidos de perfuração e eficiência mineira.
Aditivos petrolíferos e construção de capacidades
organizacionais*

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahí Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova

Fabiana Parra

Frisa María Antonieta Aliaga Guevara

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Víctor Ancajima Miñán

.....

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones
CICSHAL-RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the
CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at

<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



El presente libro tiene el aval del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina - CICSHAL.



Título: Fluidos de perforación y eficiencia minera. Aditivos petroleros y construcción de capacidades organizacionales

Derechos de autor | Copyright: Wilmer Arevalo Nima, Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocasas, Jonathan Wilson Sancarranco Estela, Gohan Augusto Chiroque Gómez, Lucerito Roxana Juárez Ramos

Primera Edición | First Edition: 2026

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 622.2 - Técnicas de excavación

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: TTU - Tecnología e ingeniería minera | TDC - Química industrial e ingeniería química | KJMV5 - Gestión de la producción y control de calidad

BISAC: TEC026000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Ingeniería

Soportal Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2026-10-21

ISBN: 978-9907-845-32-7

[APA 7]

Arevalo Nima, W., Tantaruna Ocsas, J. C. I., Sancarranco Estela, J. W., Chiroque Gómez, G. A., y Juárez Ramos, L. R. (2026). *Fluidos de perforación y eficiencia minera. Aditivos petroleros y construcción de capacidades organizacionales*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.508>

Revisión por pares

El presente libro constituye el resultado de un riguroso proceso de investigación académica, cuya calidad metodológica y solidez argumental han sido validadas mediante un sistema de revisión por pares externos implementado bajo el protocolo de doble ciego, bajo la supervisión del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina (CICSHAL). Como garantía de transparencia y rigor científico, los informes de evaluación realizados por los especialistas designados se conservan en el archivo institucional de la editorial, a disposición de las instancias que así lo requieran.

Peer Review

This book is the result of a rigorous academic research process, whose methodological quality and argumentative solidity have been validated through an external peer-review system implemented under a double-blind protocol, under the supervision of the Center for Research in Sciences and Humanities from Latin America (CICSHAL). As a guarantee of transparency and scientific rigor, the evaluation reports prepared by the designated specialists are preserved in the publisher's institutional archives, available to any party that may require them.

Sobre los autores

ABOUT THE AUTHORS

Wilmer Arevalo Nima

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0003-0917-6304>

warevalon@unp.edu.pe

Ingeniero de Petróleo (UNI), con más de 40 años de experiencia en el sector hidrocarburos y gestión ambiental, laboro en PETROPERÚ, Pérez Companc, OSINERGMIN, etc. Docente Principal y actual Decano de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNP.

Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0001-9830-8238>

jtantarunao@unp.edu.pe

Profesor Principal a Tiempo Completo de la Universidad Nacional de Piura y actual Director de la Escuela Profesional de Ingeniería de Petróleo. Cuenta con amplia experiencia en hidrocarburos en OEFA, Dirección Regional de Energía y Minas, ECOTEST, Pluspetrol y PETROPERÚ.

Jonathan Wilson Sancarranco Estela

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-4130-4583>

jsancarrancoe@unp.edu.pe

j.sancarrancoe@gmail.com

Investigador doctoral especializado en hidrocarburos, ciencia ambiental y desarrollo de soluciones sostenibles. Experto en geomembranas, caracterización y tratamiento de hidrocarburos.

Gohan Augusto Chiroque Gómez

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0009-0002-1689-294X>

gohango1099@gmail.com

Ingeniero de Petróleo (UNP), con experiencia en el sector hidrocarburos, especialmente en el área de producción y análisis de operaciones petroleras. Especializado en Data Analytics con experiencia en docencia integrando conocimientos de ingeniería y herramientas tecnológicas.

Lucerito Roxana Juárez Ramos

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0009-0009-7609-2785>

lucero.r.juarez.r@gmail.com

Bachiller en Ingeniería de Petróleo por la UNP, con experiencia en tecnología y perforación diamantina. Actualmente se desempeña como Assistant Field Technician y perforista direccional en IMDEX AMC REFLEX, especializada en operaciones de medición y perforación.

Resumen

Esta obra examina la optimización de los lodos de perforación diamantina en la Unidad Minera Antamina mediante la incorporación de aditivos y técnicas provenientes de la industria petrolera. A partir de una investigación experimental que incluyó la caracterización fisicoquímica del agua base, la evaluación reológica del lodo convencional y la formulación de un sistema mejorado, se identifican las deficiencias críticas del sistema tradicional y se propone una alternativa técnica basada en el control reológico y el tratamiento del agua. Los hallazgos evidencian mejoras sustanciales en las propiedades del fluido, la estabilidad del pozo y los indicadores operacionales, demostrando que la transferencia tecnológica entre industrias constituye una vía efectiva para superar las limitaciones de las prácticas empíricas y establecer nuevos estándares de desempeño en la perforación diamantina.

Palabras clave:

perforación diamantina; fluidos de perforación; optimización de lodos; transferencia tecnológica; industria petrolera.

Abstract

This work examines the optimization of diamond drilling muds at the Antamina Mining Unit through the incorporation of additives and techniques from the oil industry. Based on experimental research that included the physicochemical characterization of the base water, the rheological evaluation of the conventional mud, and the formulation of an improved system, the critical deficiencies of the traditional system are identified and a technical alternative based on rheological control and water treatment is proposed. The findings show substantial improvements in fluid properties, wellbore stability, and operational indicators, demonstrating that technology transfer between industries constitutes an effective pathway to overcome the limitations of empirical practices and establish new performance standards in diamond drilling.

Keywords:

diamond drilling; drilling fluids; mud optimization; technology transfer; oil industry.

Resumo

Esta obra examina a otimização dos lodos de perfuração diamantada na Unidade Mineira Antamina por meio da incorporação de aditivos e técnicas provenientes da indústria petrolífera. A partir de uma pesquisa experimental que incluiu a caracterização físico-química da água base, a avaliação reológica do lodo convencional e a formulação de um sistema melhorado, identificam-se as deficiências críticas do sistema tradicional e propõe-se uma alternativa técnica baseada no controle reológico e no tratamento da água. Os achados evidenciam melhorias substanciais nas propriedades do fluido, na estabilidade do poço e nos indicadores operacionais, demonstrando que a transferência tecnológica entre indústrias constitui uma via efetiva para superar as limitações das práticas empíricas e estabelecer novos padrões de desempenho na perfuração diamantada.

Palavras-chave:

perfuração diamantada; fluidos de perfuração; otimização de lodos; transferência tecnológica; indústria petrolífera.

FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y EFICIENCIA MINERA

Aditivos petroleros y construcción de capacidades organizacionales

CONTENIDO

Revisión por pares	7
Peer Review	7
Sobre los autores	8
About the authors	8
Resumen	10
Abstract	11
Resumo	11
Introducción	16

Capítulo 1 21

La problemática de los fluidos de perforación en la minería diamantina	21
La configuración histórica de una práctica empírica	22
Los desafíos operacionales de la perforación diamantina en Antamina	25
Las preguntas orientadoras y los propósitos de la investigación	28

Capítulo 2 32

Fundamentos conceptuales y evidencia empírica sobre la perforación diamantina y los fluidos de perforación	32
Estudios previos y experiencias documentadas en la industria extractiva	33
Fundamentos técnicos de la perforación diamantina y los sistemas de lodos	38
Yacimiento minero	38
Principales regiones con yacimientos mineros:	40
Antamina	41
Tipo de Yacimiento y Geología	43
Producción y recursos	44
Perforación diamantina	44
Procedimiento para la perforación diamantina	46
Etapas de Pre-perforación	48
Etapas de perforación	50

Etapa después de la perforación	52
Brocas utilizadas en la perforación diamantina	55
Partes de un equipo de perforación diamantina	56
Fluidos de perforación	59
Funciones principales de los fluidos de perforación	60
Tipos de fluido	62
Fluidos base aceite(OBM – Oil Based Mud)	64
Fluidos base sintéticos(SBM – Synthetic Based Mud)	65
Fluidos gaseosos o neumáticos	66
Glosario de términos básicos	68
Marco referencial	70
Cimientos conceptuales que orientan la indagación	73
Los pilares que sostienen la propuesta	74
Capítulo 3	78
El diseño de la indagación y su fundamentación metodológica	78
El sendero operativo de la indagación	79
Los instrumentos y las consideraciones éticas de la indagación	91
Capítulo 4	96
Los hallazgos y su significado para la operación minera	96
La caracterización del agua base y los lodos por máquina y fase	97
La caracterización del agua base y los lodos por máquina y fase	98
La caracterización reológica de los lodos en los pozos evaluados	106
La evaluación del desempeño operacional y la discusión de los resultados	123
Capítulo 5	129
La transferencia tecnológica como eje de transformación. Una relectura de la optimización de fluidos de perforación desde la teoría de la innovación en industrias maduras	129
Las condiciones de posibilidad de la transferencia tecnológica entre industrias	130
La validación empírica como proceso de construcción de confianza	133
La transferencia tecnológica como construcción de capacidades organizacionales	137
Conclusiones parciales: hacia una comprensión integral de la transferencia tecnológica en la minería	140

Capítulo 6	145
Los aprendizajes consolidados y las rutas para la optimización continua	145
La síntesis de los hallazgos y su significado para la operación	146
Las orientaciones para la implementación y el mejoramiento continuo	149
Las reflexiones finales sobre el significado de la investigación	153
Referencias	156

Introducción

La exploración de recursos minerales constituye una de las actividades fundamentales para el desarrollo económico del país, y en ese contexto la perforación diamantina ocupa un lugar central como técnica especializada para obtener muestras representativas del subsuelo. A través de este procedimiento se logra recopilar información precisa sobre la composición litológica y las características estructurales de los yacimientos, lo que resulta esencial para el análisis geológico y la toma de decisiones en proyectos mineros. La perforación diamantina se compone de múltiples subprocesos organizados en etapas, cada una con funciones específicas que contribuyen al éxito de la exploración, y su ejecución adecuada depende de una serie de factores técnicos entre los que destaca el desempeño del fluido de perforación.

Los fluidos de perforación son una mezcla de agua con aditivos o agregados a base de arcillas naturales que cumplen funciones esenciales durante la operación, como lubricar y enfriar la broca, transportar los recortes hacia la superficie, mantener la estabilidad del pozo y controlar las presiones de la formación. La importancia de estos fluidos es ampliamente reconocida en la industria petrolera, donde

décadas de investigación y experiencia operativa han permitido alcanzar un nivel avanzado de desarrollo técnico. Sin embargo, en la industria minera, y particularmente en la perforación diamantina, el manejo de los fluidos de perforación ha permanecido en un nivel empírico que no ha incorporado los avances disponibles en otros sectores, lo que limita la eficiencia de las operaciones y genera problemas operacionales recurrentes que afectan la productividad y la rentabilidad de las campañas exploratorias.

La mina Antamina, una de las operaciones mineras más importantes del Perú y una de las diez minas de cobre más grandes del mundo, constituye un caso representativo de esta problemática. Las condiciones geológicas de sus fases de exploración presentan desafíos significativos, incluyendo sobrecarga, rocas semi fracturadas y fracturadas, arenas y minerales que generan problemas operacionales recurrentes como pérdida de circulación, inestabilidad del pozo, alto torque, atrapamiento de tubería, desgaste prematuro de broca y rotura del cable wireline. Estos problemas, atribuibles en gran medida a deficiencias en la formulación y manejo del fluido de perforación, generan tiempos de inactividad considerables que disminuyen los metros perforados por turno y afectan directamente los costos operativos.

La presente obra aborda esta problemática desde una perspectiva integral que articula la caracterización técni-

ca de los fluidos de perforación con la adaptación de tecnologías provenientes de la industria petrolera, y con la construcción de capacidades organizacionales que permitan sostener las mejoras en el tiempo. El objetivo general que orienta el estudio consiste en desarrollar una nueva formulación para el fluido utilizado en la perforación diamantina, utilizando aditivos específicos de la industria del petróleo, con el propósito de minimizar los problemas operacionales que afectan la eficiencia de las operaciones en la mina Antamina. Para alcanzar este propósito, se han formulado objetivos específicos que estructuran el desarrollo del estudio, incluyendo la identificación de problemas potenciales mediante el monitoreo periódico del fluido, la determinación del tipo y concentración de aditivos a utilizar, el monitoreo de la eficiencia del fluido con los nuevos aditivos y la comparación de la eficiencia del fluido mejorado contra la formulación convencional.

Esta obra se distingue por su enfoque integrador, que no se limita a la selección de aditivos o al ajuste de formulaciones, sino que comprende la optimización de los fluidos de perforación como un proceso de transformación organizacional que involucra la construcción de capacidades técnicas, la gestión del cambio y la transformación de las culturas de trabajo. La investigación aspira a contribuir al conocimiento en un área poco explorada dentro de la ingeniería de perforación aplicada a minería, proporcionando datos y enfoques novedosos que pueden servir

como referencia para futuras investigaciones y para el desarrollo de soluciones prácticas aplicables en proyectos mineros complejos. En última instancia, la obra busca establecer un puente entre el conocimiento generado en la industria petrolera y su aplicación en el contexto minero, promoviendo la transferencia tecnológica y la innovación en un sector estratégico para el desarrollo del país.

Capítulo 1

La problemática de los fluidos de perforación en la minería diamantina

La configuración histórica de una práctica empírica

En la industria minera, particularmente en las operaciones de exploración mediante perforación diamantina, las condiciones reológicas del pozo constituyen un factor determinante para garantizar operaciones eficientes y seguras. Un fluido de perforación con propiedades reológicas adecuadas es fundamental para facilitar el transporte de recortes, prevenir la acumulación de sólidos en el fondo del pozo y minimizar la pérdida de fluidos hacia la formación. Estas condiciones no solo contribuyen a la estabilidad del pozo, sino que también permiten mejorar el avance por día, optimizando así el tiempo y los costos de operación. A pesar de la importancia de los fluidos de perforación en otras industrias, como la petrolera, el desarrollo y uso de estos en la industria minera, específicamente en la perforación diamantina, aún no ha alcanzado los niveles óptimos necesarios para enfrentar los desafíos geológicos complejos que caracterizan a muchos yacimientos.

La mina Antamina, una de las más grandes del Perú, es un claro ejemplo de esta problemática. Las maquinarias de perforación diamantina utilizadas en sus actividades de exploración se organizan en fases o bloques que presentan terrenos de características desafiantes, como presencia de

sobrecarga, minerales, arenas y rocas fracturadas. Estas condiciones geológicas adversas suelen generar problemas operacionales recurrentes, tales como pérdida de circulación, inestabilidad del pozo, daño a la formación, alto torque, atrapamiento de tubería, desgaste prematuro de broca y rotura del cable wire line. Estos problemas no solo comprometen la eficiencia operativa, sino que también generan tiempos de inactividad significativos, lo que afecta directamente el avance de metros perforados por turno y disminuye los tiempos efectivos de perforación, incrementando los costos operativos y reduciendo la rentabilidad de las campañas exploratorias.

A pesar de estas dificultades, la atención al manejo adecuado del fluido de perforación en la industria minera sigue siendo insuficiente. Muchos de los problemas operacionales antes mencionados son, en gran medida, consecuencia de una mala formulación e incorrecta aplicación de aditivos en el fluido de perforación empleado. Por lo tanto, se plantea como problema central la falta de investigación y desarrollo adecuado de fluidos de perforación para la industria minera, en especial en la mina Antamina, donde las condiciones geológicas complejas y los problemas operacionales derivados podrían ser mitigados con una gestión reológica eficiente. Esta situación evidencia la necesidad de adaptar técnicas y aditivos utilizados en la industria petrolera, donde el manejo de fluidos ha alcanzado un nivel avanzado, para optimizar el desempeño de los lodos en la perforación diamantina.

La justificación de esta investigación se sustenta en la falta de desarrollo adecuado de fluidos de perforación en la industria minera, específicamente en el área de perforación diamantina. A diferencia de la industria petrolera, donde el manejo de estos fluidos ha alcanzado un nivel avanzado, en minería la gestión sigue siendo insuficiente, lo que genera problemas operacionales como la pérdida de circulación y la inestabilidad del pozo. En la mina Antamina, estos problemas afectan de manera directa la eficiencia de las operaciones y aumentan significativamente los costos, lo que justifica plenamente la necesidad de investigar y desarrollar nuevas formulaciones que permitan superar las limitaciones actuales y mejorar el desempeño del proceso de perforación diamantina.

Además, esta investigación tiene un impacto relevante en múltiples niveles. Desde una perspectiva social, la optimización de los fluidos de perforación puede contribuir a una operación minera más segura y con menor impacto ambiental, minimizando riesgos para las comunidades cercanas y protegiendo los recursos naturales. En términos de importancia económica, la mejora en el uso de estos fluidos podría reducir considerablemente los costos operativos, aumentando la rentabilidad y la competitividad de empresas mineras como Antamina. Desde el punto de vista legal, una mejor gestión de los fluidos de perforación puede ayudar a cumplir con normativas ambientales, reduciendo el riesgo de sanciones y asegurando que

las empresas operen dentro de los marcos regulatorios, lo cual es vital para la sostenibilidad de sus operaciones a largo plazo.

Los desafíos operacionales de la perforación diamantina en Antamina

La perforación diamantina es una técnica especializada empleada en la exploración geológica y en operaciones mineras, cuyo objetivo principal es obtener muestras de roca con alta fidelidad y exactitud. Este procedimiento consiste en cortar y extraer núcleos cilíndricos de roca mediante el uso de brocas que contienen diamantes industriales. Gracias a este método, se logra recopilar información precisa sobre la composición litológica y las características estructurales del subsuelo a distintas profundidades. La perforación diamantina se fundamenta en la extraordinaria dureza del diamante, lo que le permite cortar con eficiencia una amplia variedad de rocas y materiales. Esta técnica puede aplicarse tanto en trabajos de superficie como en ambientes subterráneos, utilizando un equipo especializado conocido como sonda, que incorpora una broca con diamantes industriales de distintos tamaños seleccionados en función de las características específicas de la perforación.

En la mina Antamina, las condiciones del terreno suelen provocar problemas significativos que afectan la eficiencia operativa. Las fases de exploración presentan características desafiantes en sus primeros metros, iniciando con sobrecarga, roca semi fracturada y fracturada, arenosa, mineralizada y abrasiva. Estas condiciones generan una serie de problemas operacionales recurrentes, entre los que se incluyen la pérdida de circulación, la inestabilidad del pozo, el daño en la formación, el alto torque, el atrapamiento de tuberías, el desgaste prematuro de broca y tubería, así como la rotura del cable wire line. Cada uno de estos problemas contribuye a aumentar los tiempos de inactividad, lo que se traduce en una disminución directa de los metros perforados por turno y en un incremento de los costos operativos que afectan la viabilidad económica de las campañas de exploración.

La delimitación geográfica de esta investigación comprende el yacimiento minero Antamina, ubicado en el distrito de San Marcos de la provincia de Huari, departamento de Áncash. La mina Antamina es una de las más emblemáticas y productivas del Perú, y también una de las diez minas de cobre más grandes del mundo. Cuenta con máquinas de perforación diamantina para el área de exploración, las cuales se encuentran organizadas en bloques denominados fases. La Fase 07 presenta características desafiantes en sus primeros metros, iniciando con sobrecarga, roca semi fracturada y fracturada, arenosa,

mineralizada y abrasiva. Por otro lado, la Fase 09 inicia con roca competente, pero a medida que se profundiza, se encuentra con roca fracturada, arenosa y mineralizada. Estas condiciones del terreno suelen provocar problemas significativos que afectan la eficiencia operativa y generan tiempos de inactividad considerables, lo que justifica la necesidad de investigar nuevas formulaciones de fluidos que permitan mitigar estos problemas.

Figura 1. Ubicación de Mina Antamina



Nota: GoogleEarth

La mina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la Región Áncash, a 200 km de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4300 msnm. Además, cuenta también con el puerto de embarque Punta Lobitos, ubicado en la provincia costera de Huarney. La operación de Antamina se caracteriza por ser un yacimiento polime-

tálico complejo que produce concentrados de cobre, zinc, molibdeno, plata y plomo, lo que la convierte en una de las operaciones mineras más importantes del país y del mundo. El tipo de depósito es Skarn, formado por la intrusión de un pórfido cuarzo-monzonítico en rocas calcáreas, con formaciones geológicas como la Formación Jumasha y la Formación Celendín, y una zonación de skarn que incluye endoskarn, skarn intermedio y exoskarn, con minerales principales como calcopirita, bornita, esfalerita, molibdenita, granates, wollastonita y diópsido.

Las preguntas orientadoras y los propósitos de la investigación

A partir de la problemática identificada, se formulan una serie de preguntas que orientan el desarrollo de esta investigación. La pregunta general que articula el estudio es la siguiente: ¿Es posible minimizar los problemas operacionales en la perforación diamantina adaptando mejoras en los lodos de perforación desarrollados para la industria petrolera? Esta interrogante principal se desglosa en cuatro preguntas específicas que abordan diferentes dimensiones del problema. En primer lugar, se busca determinar cómo influye la reología de los lodos de perforación en la estabilidad del pozo durante la perforación diamantina. En segundo lugar, se plantea identificar qué aditivos se pueden emplear para la mejora en la perfora-

ción diamantina. En tercer lugar, se busca establecer qué controles se deben implementar para asegurar que las mejoras en los lodos de perforación logren los resultados deseados en términos de rendimiento operativo y seguridad. Finalmente, se pretende determinar qué beneficios se obtienen con la mejora de la formulación del fluido utilizado en la perforación diamantina, considerando tanto los aspectos técnicos como los económicos y ambientales.

El objetivo general que guía esta investigación consiste en desarrollar una nueva formulación para el fluido utilizado en la perforación diamantina, utilizando aditivos específicos de la industria del petróleo, con el propósito de minimizar los problemas operacionales que afectan la eficiencia de las operaciones en la mina Antamina. Para alcanzar este propósito, se han formulado cuatro objetivos específicos que estructuran el desarrollo del estudio. El primer objetivo específico es identificar problemas potenciales mediante el monitoreo periódico del fluido utilizado durante la perforación diamantina. El segundo objetivo específico es determinar el tipo y concentración de aditivos a utilizar tomando en cuenta los datos de monitoreo tomados en campo. El tercer objetivo específico es monitorear la eficiencia del fluido de perforación con el empleo de los nuevos aditivos durante la perforación diamantina. El cuarto objetivo específico es comparar la eficiencia del fluido con la nueva formulación contra

la eficiencia del fluido con la formulación convencional durante la perforación diamantina, estableciendo así una base sólida para la evaluación de la mejora propuesta.

La estructura del capítulo se organiza en tres secciones que abordan de manera secuencial los aspectos problemáticos de la investigación. La primera sección examina la configuración histórica de la práctica empírica en la perforación diamantina, identificando las causas estructurales de la ineficiencia y caracterizando los impactos operativos que de ellas se derivan. La segunda sección analiza los desafíos operacionales específicos que enfrenta la mina Antamina, describiendo las condiciones geológicas del yacimiento y los problemas recurrentes que afectan la eficiencia de las operaciones. La tercera sección presenta las preguntas orientadoras y los propósitos de la investigación, estableciendo los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo del estudio y delimitando el alcance geográfico de la investigación en el yacimiento minero Antamina. Esta estructura permite al lector comprender de manera integral la problemática que motiva la investigación y los propósitos que se persiguen con su desarrollo.

Capítulo 2

Fundamentos conceptuales y evidencia empírica sobre la perforación diamantina y los fluidos de perforación

Estudios previos y experiencias documentadas en la industria extractiva

Porras (2024), en su tesis titulada: “Influencia de los tipos de brocas en la perforación diamantina de la veta Margot-cia minera Raura-Oyón-2024” para optar el título profesional de ingeniero geólogo. El presente estudio evalúa la influencia de los tipos de brocas en la perforación diamantina de la veta Margot en la Cía Minera Raura, Oyón-2024. Se determinó la relación entre la litología de la veta, el tipo de broca y el rendimiento en la perforación diamantina, así como la influencia de los aditivos utilizados y su impacto en el proceso. Durante mayo, junio y julio de 2024, se realizaron siete sondeos empleando brocas Hardcore X8, X10 y Boyles, manteniendo constantes las variables de aditivos y RPI según las recomendaciones de los fabricantes. La litología de la veta incluyó materiales como carbonatos, mármol, mármol skarnizado, pórfido y toba volcánica, lo que permitió evaluar el desempeño de las brocas en diversas condiciones geológicas. La metodología incluyó el uso de equipos de perforación diamantina estándar, medición continua del avance y análisis de costos por metro perforado, complementado con herramientas estadísticas para determinar la relación entre los tipos de brocas y los costos operativos. Los resultados indican que la broca Hardcore X10 logró un avance promedio de 15.31 m/turno y un costo de 5.78 \$/m, siendo la más eficiente

en términos de costos y rendimiento. En comparación, la broca Hardcore X8 presentó un costo de 13.42 \$/m, mientras que la broca Boyles mostró un costo intermedio de 10.31 \$/m, evidenciando que su uso no es óptimo en las condiciones geológicas de la veta Margot. Se concluye que la broca Hardcore X10 es la opción más eficiente para la perforación diamantina en la veta Margot, considerando tanto el costo operativo como el avance por turno, resaltando la importancia de las características geológicas al seleccionar el tipo de broca, lo cual optimiza los costos y mejora la eficiencia del proceso en minería de exploración.

Condori Hanco (2019), en su tesis titulada: “Estudio geológico y perforación diamantina del proyecto Atalaya, distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Anchas” para optar el título profesional de ingeniero geólogo. En este estudio se describe el proyecto Atalaya de propiedad de Cia, Minera Santa Luisa, se localiza en el distrito de Huallanca. En el flanco occidental de la cordillera de los Andes. Forma parte de la cuenca del río San Juan, que llega hasta la localidad de Huallanca, donde confluye con el río Torres para formar el río Vizcarra, afluente del río Marañón. La litología regional predominante en la zona de estudio se encuentra constituida por rocas sedimentarias cretácicas. Estructuralmente la zona de estudio se encuentra afectada por el plegamiento que afecta a la secuencia sedimentaria cretácica, debido a los esfuerzos

de compresión y distensión, dando como resultado el desarrollo de fallas, anticlinales y sinclinales con tendencia general NO-SE asignados a la fase tectónica Inca del Eoceno medio –Oligoceno inferior. Las alteraciones presentes en el depósito dentro de la zona de estudio corresponden a una alteración progradada caracterizada por la formación de minerales anhidros como granates y piroxenos, posteriormente se superpone una alteración retrogradada que está controlada por la disminución de la temperatura y la mezcla con aguas meteóricas en la fase tardía del sistema, que afectan a los minerales anhidros para formar minerales como: Epidota, clorita, calcita, cuarzo y sericita. En base a estudios realizados de los testigos de perforación se planteó que en el proyecto Atalaya presenta características de un depósito metasomático de contacto tipo Skarn de Pb-Zn.

El resultado de los trabajos de perforación permitió confirmar dos zonas mineralizadas como son: la zona mineralizada en la formación Jumasha y la zona mineralizada en la formación Pariahuanca. En base a la ocurrencia de mineral en ambos cuerpos mineralizados estos se clasifican en dominios de mineral en la zona de Skarn, sulfuro masivo del tipo Pirrotita (Po) o pirita (Py), dominio Shiroji y el dominio de mineral pórfido granítico (PQ).

Alvarez Juarez (2019), en su tesis titulada: “Optimización de costos de perforación diamantina mediante las brocas

Hayden en la contrata minera Explomin del Perú S.A. – Unidad Minera San Rafael–Puno”, para optar el título profesional de ingeniero de minas.

En su estudio menciona que la Contrata Minera Explomin del Perú S.A. es una de las contratas de la Unidad Minera San Rafael propiedad de la Cia Minera MINSUR A.A., se encuentra ubicada dentro de la jurisdicción del distrito de Antauta, provincia de Melgar y departamento de Puno. En la actualidad viene realizando perforaciones diamantinas en la zona San Germán para determinar la continuidad de las reservas de mineral, en una longitud proyectada de 450 metros lineales. Al realizar la evaluación a una distancia de 100 metros de avance lineal, se encontró el problema de elevados costos de perforación diamantina debido a las características de las brocas JC Portal. De continuar con este problema afectaría al presupuesto de ejecución y los beneficios económicos que debe generar para la Contrata Minera Explomin del Perú S.A. el objetivo del estudio de investigación es optimizar los costos de perforación diamantina mediante las brocas Hayden en la zona San Germán de la contrata minera Explomin del Perú S.A. – Unidad Minera San Rafael – Puno. La metodología para desarrollar el presente estudio de investigación ha consistido en su primera etapa en realizar la evaluación de las operaciones de perforación diamantina con las brocas JC Portal en la zona San Germán. En dicha evaluación se ha considerado, el diámetro de la broca, vida útil de la broca,

costo de la broca, rendimiento de la broca, costos de máquina, tipo de roca y aditivos de perforación, dichos controles se han realizado durante 10 días, equivalentes a 20 guardias. Posteriormente en el estudio de investigación se ha realizado la evaluación de la perforación diamantina con las brocas Hayden, considerando en el control, el diámetro de la broca, vida útil de la broca, costo de broca, aditivos de perforación, rendimiento de las brocas, costo de máquina y tipo de roca. Estos controles se han realizado durante 10 días, equivalente a 20 guardias. Posteriormente en el estudio de investigación se ha realizado la evaluación de la perforación diamantina con las brocas Hayden, considerando en el control, el diámetro de la broca, vida útil de la broca, costo de broca, aditivos de perforación, rendimiento de las brocas, costo de máquina y tipo de roca. Estos controles se han realizado durante 10 días, equivalentes a 20 guardias. Los datos se han registrado en las fichas de control correspondiente. En el trabajo de investigación se ha minimizado los costos de perforación diamantina mediante el uso de las brocas Hayden que tiene una vida útil de 110 metros perforados. Finalmente, los costos de perforación diamantina se han optimizado de 11,44 USS/m a 10,50 USS/m., mediante el uso de las brocas Hayden, haciendo una diferencia de 0,94 USS/m, en la zona San Germán de la contrata minera Explomin del Perú S.A. – Unidad Minera San Rafael – Puno.

Fundamentos técnicos de la perforación diamantina y los sistemas de lodos

Yacimiento minero

Un yacimiento minero es una concentración natural de minerales en la corteza terrestre, que puede ser explotada económicamente. Estos yacimientos se forman a través de procesos geológicos que concentran minerales valiosos en cantidades suficientes para justificar su extracción. Os yacimientos pueden encontrarse en diferentes tipos de formaciones geológicas y pueden contener una variedad de minerales como metales preciosos (oro, plata), metales base (cobre, plomo, zinc), minerales industriales (fosfatos, yeso) y minerales energéticos (carbón, uranio).

Los yacimientos mineros son evaluados y explotados mediante técnicas de exploración y perforación, como la perforación diamantina, que permite obtener muestras de roca para su análisis y determinar la viabilidad económica de la explotación.

Clasificación de yacimiento mineros:

Los yacimientos mineros se pueden clasificar en varios tipos según su origen y las condiciones geológicas que los forman.

Yacimientos de origen magmático

Estos yacimientos se forman a partir de procesos magmáticos, donde el magma se enfría y solidifica en la corteza

terrestre. Ejemplos de estos yacimientos incluyen los depósitos de cromita, magnetita y algunos tipos de sulfuros de níquel y cobre.

Yacimientos de origen hidrotermal

Se forman cuando soluciones hidrotermales (agua caliente con minerales disueltos) se infiltran en las rocas y depositan minerales en las fracturas y cavidades. Estos yacimientos son comunes para minerales como el oro, la plata, el cobre y el zinc

Yacimientos sedimentarios

Estos yacimientos se forman por la acumulación de sedimentos en ambientes acuáticos, como ríos, lagos y océanos. Los minerales se concentran en capas sedimentarias. Ejemplos incluyen los depósitos de hierro, fosfatos y algunos tipos de carbón

Yacimientos metamórficos

Se forman cuando las rocas preexistentes son sometidas a altas temperaturas y presiones, lo que provoca cambios en su composición mineralógica. Ejemplos de estos yacimientos incluyen los depósitos de grafito y algunos tipos de talco

Yacimientos de placer

Estos yacimientos se forman por la concentración de minerales pesados en sedimentos sueltos, como arenas y gravas, debido a la acción del agua. Son comunes para minerales como el oro, el platino y algunos tipos de gemas.

Principales regiones con yacimientos mineros:

- Arequipa: Rica en cobre, oro y plata
- Moquegua: Importantes reservas de cobre.
- Áncash: Hogar de Antamina, con cobre y zinc.
- Apurímac: Gran potencial geológico, sede de Las Bambas.
- Cajamarca: Oro y plata, con presencia de yanacocha.
- Junín y Pasco: Zinc, plomo y plata.
- Cusco: Cobre y oro, con yacimientos como Antapaccay y Constancia

Tabla 1. Principales empresas mineras en el Perú

Empresa Minera	Región Principal	Tipo de Minería
Antamina	Áncash	Tajo abierto
Anglo American Quellaveco	Moquegua	Tajo abierto
Southern Perú Copper Corporation	Moquegua, Tacna	Tajo abierto
Sociedad Minera Cerro Verde	Arequipa	Tajo abierto
Minera Yanacocha	Cajamarca	Tajo abierto
Shougang Hierro Perú	Ica	Tajo abierto
Minera Las Bambas	Apurímac	Tajo abierto
Minera Chinalco Perú	Junín	Tajo abierto
Compañía de Minas Buenaventura	Varias regiones	Subterránea
Minsur	Puno, Tacna	Subterránea
Volcan Compañía Minera	Junín, Pasco	Subterránea
Hudbay Perú	Cusco	Tajo abierto
Marcobre	Ica	Tajo abierto

Empresa Minera	Región Principal	Tipo de Minería
Compañía Minera Antapaccay	Cusco	Tajo abierto
Compañía Minera Poderosa	La Libertad	Subterránea
Gold Fields La Cima	Cajamarca	Tajo abierto

Nota: Juárez Ramos (2026).

Estas empresas extraen principalmente cobre, oro, zinc, plata, plomo, estaño y molibdeno. Perú es el segundo productor mundial de cobre y plata, y el primero en América Latina en producción de zinc y molibdeno (Marineresources, 2020).

Antamina

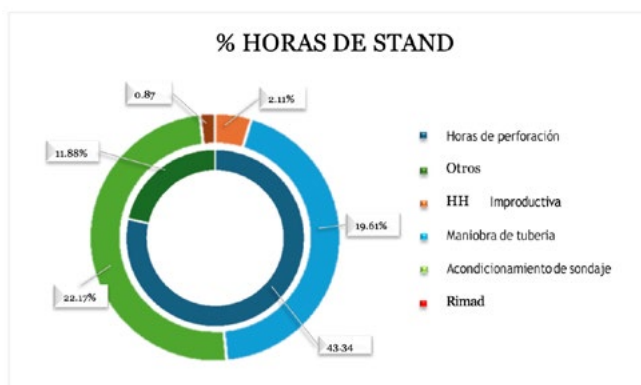
La mina Antamina es una de las más emblemáticas y productivas del Perú, y también una de las diez minas de cobre más grandes del mundo. Cuenta con máquinas de perforación diamantina para el área de exploración, estas máquinas se encuentran organizadas en bloques denominadas fases. La Fase 07 presenta características desafiantes en sus primeros metros, iniciando con sobrecarga, roca semi fracturada y fracturada, arenosa, mineralizada y abraciba. Por otro lado, la Fase 09 inicia con la roca competente, pero a medida que se profundiza, se encuentra con roca fracturada, arenosa y mineralizada.

Estas condiciones del terreno suelen provocar problemas significativos, como:

- Pérdida de circulación
- Inestabilidad del pozo
- Daño en la formación
- Alto torque
- Atrapamiento de tuberías
- Desgaste prematuro de broca y tubería
- Rotura de cable wire line
- Aumenta el tiempo de paradas

Los tiempos de inactividad resultantes de estas problemáticas afectan directamente el avance de metros por turno ya que disminuyen los tiempos efectivos de perforación.

Figura 2. Porcentaje de horas de inactividad



Nota: Juárez Ramos (2026).

La mina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la Región Ancash, a 200 km de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4300 msnm. Además, cuenta también con el puerto de embarque Pun-

ta Lobitos, ubicado en la provincia costera de Huarvey (Antamina, 2025).

Figura 3. Somos Antamina



Nota: antamina.com

Tipo de Yacimiento y Geología

- Tipo de depósito: Skarn, formado por la intrusión de un pórfido cuarzo-monzonítico en rocas calcáreas.
- Formaciones geológicas:
 - » Formación Jumasha
 - » Formación Celendín
- Zonación de skarn:
 - » Endoskarn (cercano al intrusivo)
 - » Skarn intermedio
 - » Exoskarn (más alejado)

- **Minerales principales:**
 - » Calcopirita, bornita, esfalerita, molibdenita.
 - » Granates, wollastonita, diópsido

Producción y recursos

- **Minerales extraídos:** cobre (Cu), zinc (Zn), plata (Ag), molibdeno (Mo), bismuto (Bi), plomo (Pb) (secundario).
- **Producción anual (2021):** 641,505 toneladas métricas de cobre.
- **Reservas estimadas:** 745 millones de toneladas métricas.
- **Recursos totales:** 1,935 millones de toneladas métricas.
- **Vida útil estimada:** hasta el año 2029

Perforación diamantina

La perforación diamantina es una técnica especializada empleada en la exploración geológica y en operaciones mineras, cuyo objetivo principal es obtener muestras de roca con alta fidelidad y exactitud. Este procedimiento consiste en cortar y extraer núcleos cilíndricos de roca con alta fidelidad y exactitud. Este procedimiento consiste en

cortar y extraer núcleos cilíndricos de roca mediante el uso de brocas que contienen diamantes industriales. Gracias a este método, se logra recopilar información precisa sobre la composición litológica y las características estructurales del subsuelo a distintas profundidades.

Una de las principales fortalezas de la perforación diamantina es su capacidad para generar muestras representativas del contexto geológico. Esto se realiza mediante la recuperación continua de núcleos cilíndricos, los cuales son posteriormente caracterizados, sometidos a análisis químicos y evaluaciones metalúrgicas. El proceso se ejecuta bajo estrictas directrices técnicas, que incluyen parámetros específicos como la profundidad, el diámetro del núcleo, la orientación del pozo y la eficiencia en la recuperación, todo ello bajo normas de seguridad establecidas.

La perforación diamantina se fundamenta en la extraordinaria dureza del diamante, lo que le permite cortar con eficiencia una amplia variedad de rocas y materiales. Esta técnica puede aplicarse tanto en trabajos de superficie como en ambientes subterráneos, utilizando un equipo especializado conocido como sonda. Dicha sonda incorpora una broca con diamantes industriales de distintos tamaños, seleccionados en función de las características específicas de la perforación (Porrás Cristobal, 2024).

Durante la ejecución del proceso, la corona diamantada, acoplada a la tubería mediante un escariador, se mantiene

refrigerada y lubricada mediante la circulación de lodo a través de las barras huecas de perforación. Estas barras, que poseen longitudes determinadas y se ensamblan entre sí, permiten alcanzar profundidades significativas. Al finalizar cada tramo perforado, se procede al reemplazo de la tubería para continuar con el avance del pozo.

Una vez que la corona ha avanzado por rotación, se forma un testigo cilíndrico de roca sólida, que se recoge dentro del tubo interior mediante un mecanismo de pescador y wire line. Este proceso se repite hasta alcanzar la profundidad deseada, proporcionando muestras precisas y representativas para su posterior análisis y evaluación (Condori & Satalaya, 2022).

Procedimiento para la perforación diamantina

El procedimiento de perforación diamantina se adapta según el diámetro de las muestras obtenidas, el cual se selecciona en función del objetivo particular que se desea alcanzar. Por ejemplo:

- Las muestras con diámetro PQ se emplean principalmente en trabajos metalúrgicos y otros propósitos específicos.
- Las de diámetro HQ se utilizan en tareas de exploración, ya que permiten obtener una muestra adecuada para realizar evaluaciones detalladas.

- En cuanto a las muestras de diámetro NQ, estas suelen extraerse una vez que se ha alcanzado el diámetro máximo HQ. Este cambio permite continuar la perforación en profundidad, especialmente cuando se presentan obstáculos.

En situaciones donde la perforación con NQ se ve obtaculizada, es crucial cambiar a la línea BQ, que permite alcanzar mayores profundidades. Además, se mencionan otros diámetros de perforación, como el diámetro AQ, que se refiere a perforaciones cortas y contribuyen a las labores mineras subterráneas. Los procedimientos estándar en la perforación diamantina incluyen: control diario del avance, cálculo de la recuperación del testigo, riesgo de logueo y muestreo (Bajerano, 2017).

Figura 4. Diámetro estándar de perforación diamantina



Denominación	Diámetro de testigo (mm)	Diámetro externo (pozo) (mm)
AQ	27,00	48,00
BQ	36,40	48,00
NQ	47,60	75,70
HQ	63,50	96,00
PQ	84,00	122,60
BQ3	33,50	60,00
NQ3	45,10	75,70
HQ3	61,10	96,00

Nota: Altamirano & Coba (2021).

La exploración minera involucra un conjunto detallado de actividades orientadas a identificar y determinar la viabilidad de los depósitos minerales ubicados bajo la superficie. En este contexto, la perforación diamantina constituye una fase fundamental y altamente técnica, compuesta por 16 subprocesos consecutivos. Estos subprocesos se organizan en tres etapas principales, cada una de las cuales desempeña un rol esencial en la recopilación de datos geológicos precisos y en la formulación de decisiones informadas respecto al potencial de un yacimiento mineral.

La perforación con diamante se estructura en 16 subprocesos consecutivos, distribuidos en tres etapas diferenciadas.

Etapas de Pre-perforación

- **Recepción de plataforma**

Antes de iniciar la perforación diamantina, se realiza una visita preliminar al área de trabajo con el propósito de definir la ubicación exacta. Luego, se lleva a cabo el traslado del equipo humano y técnico, acompañado de una evaluación visual detallada del terreno.

Traslado a plataforma

Este paso comprende el transporte de herramientas, maquinaria, instrumentos y demás equipos necesarios para la ejecución de las labores en el sitio designado.

Instalación de plataforma

Consiste en establecer la conexión eléctrica entre la subestación y la plataforma mediante el cableado correspondiente. Posteriormente, se implementa un plan de trabajo que incluye la instalación de equipos y la organización de los suministros. A continuación, se procede con la nivelación del terreno y la preparación de la superficie para garantizar condiciones óptimas de operación.

Inyección de fluidos

Una vez que la plataforma está lista, se procede a la apertura del pozo, realizando la inyección de fluidos para facilitar el avance de la perforación y estabilizar el entorno del barreno.

Instalación de herramientas

Se colocan las herramientas necesarias en el equipo de perforación, asegurando que estén correctamente alineadas y calibradas. En esta etapa, se verifica el funcionamiento del sistema de rotación y se ajusta la presión de inyección de fluidos, que puede variar según el tipo de terreno (normal o con inclinación).

Inyección de polímeros

Cuando las condiciones del terreno lo requieren, se incorporan polímeros con el objetivo de mejorar la estabilidad del pozo y optimizar la circulación de los fluidos.

Esta mezcla se introduce por el cabezal, permitiendo una inyección controlada y eficiente.

Etapas de perforación

La perforación tiene como objetivo identificar los estratos y componentes del subsuelo, así como determinar la ubicación precisa para realizar las pruebas de perforación.

- Extracción del estrato.

Se introduce una muestra del macizo rocoso en el tubo interior, verificando los indicadores de presión hasta que el tubo se llene completamente. Una vez que esto ocurre, se interrumpe la inyección de fluido y se procede a cortar el estrato, siempre y cuando el tubo interior esté completamente lleno.

- Extracción del tubo interior

Las perforaciones positivas se inician al elevar el pescante conectado al cable de acero. Se extrae la caja de la serie de perforación para conectar el pasador guía al cabezal, lo que permite el contacto con el cable. Luego, se baja el tubo interior hasta que se acople con el cabezal. Si el tubo está lleno, se retira para analizar la muestra obtenida. En caso contrario, se repite el proceso de perforación.

- Identificación del estrato

La identificación del estrato se realiza mediante la observación de los componentes presentes en la muestra. Esta información permite determinar si se ha alcanzado el estrato objetivo o si es necesario continuar con la perforación.

- Registro de la muestra

Una vez extraída la muestra, se procede a su registro, anotando las características físicas y geológicas observadas. Este paso es fundamental para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones en etapas posteriores del estudio.

- Movimiento de accesorios de la perforación diamantina

Este procedimiento tiene tres funciones distintas: inserción y extracción de la varilla, modificación de la entrada de la perforación y reducción del diámetro. Las barras de perforación se manipulan manualmente para su acoplamiento o desacoplamiento antes de la sincronización del comando de control para la inserción o retirada de la barra. Cuando hay que modificar las entradas de perforación, se comienza con el ascenso o descenso de las barras de perforación, seguido de la evacuación de la tubería exterior a la superficie para un examen técnico visual. A con-

tinuación, se sustituye la barra de perforación y se baja o se eleva la barra de perforación. El hecho de que la perforación sea positiva o negativa determinará la disminución del diámetro. Si la perforación es satisfactoria, se retira la herramienta para sustituir la entrada de perforación (zapata), y las barras se elevan hasta el fondo del pozo y se fijan a la corona del túnel. La broca se encoge hasta un diámetro reducido antes de insertar la sarta de varillas encogidas en el revestimiento fijado a la broca. Del mismo modo, para la perforación negativa, se retira la herramienta para cambiar la entrada de la perforación (zapata), se cambian las mordazas a un diámetro menor, se bajan las barras y, por último, se bajan el tren de barras de menor diámetro (Herrera Herbert & Castilla Gomez, 2012)

Etapas después de la perforación

Una vez concluida la perforación, se realizan diversas actividades para asegurar la calidad de la muestra y obtener información precisa sobre el subsuelo.

- Encajado de las muestras

El encajado se realiza según el propósito de la perforación, ya sea geológico o geotécnico. En el caso de muestras geológicas, se colocan manualmente en

la caja de testigos, utilizando tapones para separar cada segmento y luego se cierra la caja. Para muestras geotécnicas, el procedimiento es similar, pero la muestra se deposita en la caja con una inclinación específica.

- Medición de trayectoria

Se inicia con la inspección del equipo para verificar que esté en condiciones adecuadas. Posteriormente, se realiza la medición de trayectoria, que puede hacerse manualmente si el equipo no cuenta con sistema automatizado. Este proceso permite conocer la dirección y profundidad de la perforación.

- Término de sondaje

El procedimiento comienza con el traslado de las herramientas y termina con el desmontaje de la plataforma. El movimiento de la herramienta vendrá determinado por si la perforación es positiva o negativa. La perforación positiva comienza con la retirada de las barras de perforación, seguida de la retirada de las barras de revestimiento cortando el anclaje y apilándolas en un sector del emplazamiento. La perforación negativa comienza con la retirada de las barras de perforación, seguida de la retirada de las barras de revestimiento y su almacenamiento en un sector de la posición. Los amarres de la sonda se cor-

tan durante el procedimiento de desmontaje, al que sigue el desmontaje de la plataforma y, por último, se desconecta la energía eléctrica.

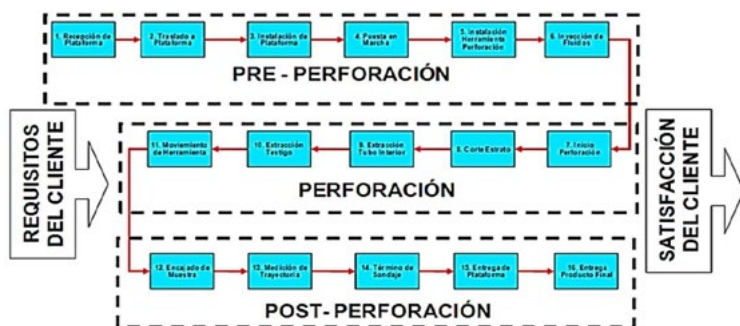
- Entrega de la plataforma

Comienza con la visita del cliente al emplazamiento para una evaluación técnica y termina con el abandono de la postura.

- Entrega del producto final

Las cajas se introducen en el vehículo y se conducen hasta el lugar donde se procesarán las muestras (Castilla Gomez & Herrera Herbert, 2012).

Figura 5. Proceso de perforación diamantina



Nota: Salas (2016).

En resumen, la perforación diamantina no solo constituye una herramienta clave en la exploración minera,

sino que también representa un proceso altamente técnico que requiere planificación detallada y ejecución precisa. Su estructura en etapas y subprocesos permite obtener información confiable sobre las características del subsuelo, lo que la convierte en un componente indispensable para la evaluación de depósitos minerales y el desarrollo de proyectos sostenibles.

Brocas utilizadas en la perforación diamantina

Las brocas diamantadas se analizan como materiales compuestos de dos fases, en las que los diamantes están embebidos dentro de una matriz. Esta matriz también presenta una estructura bifásica, conformada por una base de polvos metálicos reforzada con partículas adicionales, especialmente en aquellas brocas producidas mediante técnicas de infiltración. En la mayoría de los casos, la matriz metálica incluye polvos de metales duros como el carburo de tungsteno, junto con elementos de soldadura tales como cobre, plata o níquel, que contribuyen a la cohesión y funcionalidad del conjunto.

Las diferentes combinaciones de cantidad y tipos de polvos metálicos, como cantidad y tamaño de diamantes, da como resultado diferentes tipos de brocas, y cada una de estas recomendadas para un determinado tipo de suelo a perforar (suelos duros, extraduros, abrasivos, no abrasivos, blandos o suaves) (Garay, 2014).

Partes de un equipo de perforación diamantina

La máquina de perforación diamantina comprende dos partes principales: la unidad motriz y la columna de perforación.

1. Unidad motriz

Se trata de un motor que utiliza un sistema de enfriamiento combinado, mediante agua y aire. Las tres bombas principales encargadas de activar el circuito hidráulico están conectadas directamente al volante del motor. Además, cuenta con un generador de 12 voltios que suministra energía a los componentes eléctricos del equipo.

2. Columna de perforación

La columna de perforación se compone de un conjunto de elementos que, al ser ensamblados, trabajan de manera conjunta para ejecutar el proceso de perforación diamantina. Este sistema está integrado por las siguientes partes:

a. Mástil de operación

Su función principal es proporcionar la inclinación necesaria al sondaje, además de ofrecer soporte estructural a la unidad de rotación, la canastilla y la tubería de perfo-

ración, entre otros componentes. Esta estructura debe estar diseñada para soportar las fuerzas de flexión generadas por el peso del equipo, los esfuerzos de empuje durante la operación y las tensiones provocadas por el movimiento rotatorio.

b. Tambor de winche

Es un mecanismo, ya sea hidráulico o eléctrico, que consiste en un cilindro rotativo sobre el cual se enrolla un cable. Este cable se extiende hasta la parte superior del mástil y permite realizar el ascenso y descenso de las barras de perforación durante el proceso operativo.

c. Bombas de lodos

Su función es introducir el lodo de perforación a través del interior de las tuberías y de la corona diamantada, con el propósito de lubricar y enfriar el sistema, facilitar la remoción de detritos, y acondicionar el pozo. Este proceso asegura que el fluido circule de manera continua dentro del pozo, garantizando la eficiencia operativa.

d. Wireline (línea de cable)

Se trata de un cable delgado, conocido como wireline, cuyo extremo inicial está unido al pescador. Al activarse el motor, este dispositivo permite que el pescador, mediante el wireline, eleve o descienda el tubo interior que contiene la muestra de perforación, también denominada testigo.

e. Triconos

Cuando la recuperación del tipo de suelo no representa un interés económico al inicio de la perforación, se recomienda emplear el método de triconeo. Este procedimiento consiste en perforar sin obtener muestras, hasta alcanzar la profundidad deseada. Una vez finalizada la operación, se debe instalar el casing en el tramo perforado. El tricono está compuesto por tres conos giratorios montados sobre un eje, que al rotar fragmentan la roca por desprendimiento. Los fragmentos generados (cuttings) son removidos mediante la circulación continua de fluido o lodo de perforación, que además contribuye a refrigerar y limpiar el pozo.

- Coronas de perforación
- Escariador
- Tubos de perforación
- Tubo interior
- Casing (revestimiento)
- Zapatas de revestimiento (casing shoes)
- Overshot (pescador)
- Head assembly (cabezal)
- Core barrel (tubo porta testigos o tubo interior)

Fluidos de perforación

Un fluido de perforación es una mezcla compuesta por una base solvente (que puede ser líquida, gaseosa o una combinación de ambas) y diversos aditivos químicos. Su función principal es proporcionar las propiedades físico-químicas necesarias para enfrentar las condiciones operativas durante el proceso de perforación.

Las propiedades físico-químicas de un fluido de perforación son esenciales, ya que le permiten resistir la influencia negativa de los contaminantes provenientes de la formación perforada. Además, el fluido debe conservar sus características para asegurar su eficacia bajo las condiciones operativas.

Funciones principales de los fluidos de perforación

Las funciones del fluido de perforación se refieren a las tareas que es capaz de desempeñar como:

Control de las presiones del subsuelo:

La densidad del fluido de perforación debe ser adecuada para contener cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo.

Remover los recortes perforados del pozo:

El fluido transporta los recortes desde el fondo hacia la superficie, evitando que se acumulen y dificulten la perforación.

Suspender los recortes cuando se detiene la circulación:

Cuando la circulación se interrumpe por un tiempo determinado, los recortes quedan suspendidos debido a una característica del lodo llamada “gelatinosidad” la cual evita que los cortes caigan al fondo y causen problemas al meter la tubería y al reanudar la perforación.

Enfriar y lubricar el trépano:

Esta capacidad lubricante se demuestra en la disminución de la torsión de la sarta, aumento de la vida útil de la barrena, reducción de la presión de la bomba, etc.

Formar revoque:

Esto se refiere a la propiedad que tiene el lodo para formar un enjarre o película que se forman en las paredes del agujero que sea liso, delgado, flexible y de baja permeabilidad; lo cual ayuda a minimizar los problemas de derrumbes y atascamiento de la tubería, además de consolidar a la formación.

Evitar corrosión de herramientas:

El fluido ayuda a proteger las herramientas y componentes metálicos frente a procesos de corrosión durante la perforación.

Aliviar el peso de la sarta:

El peso de la sarta de perforación y el de la tubería de revestimiento en el lodo, es igual a su peso en el aire multiplicado por dicho factor de flotación. El aumento de la densidad del lodo conduce a una reducción del peso total que el equipo de superficie debe soportar.

Asegurar una evaluación adecuada de la formación:

Permite mantener el pozo estable y conservar la calidad del testigo, facilitando una correcta interpretación de las características de la formación.

Minimizar el impacto al medio ambiente:

El uso adecuado de fluidos y aditivos busca reducir la generación de residuos y evitar afectaciones al suelo y al agua.

Tipos de fluido

Los fluidos se agrupan principalmente según el componente que forma su fase continua

Fluidos base agua (WBM – Water Based Mud)

Son fluidos de perforación cuya fase continua es el agua, a la que se incorporan diferentes aditivos para controlar propiedades como la viscosidad, densidad, pH, filtración y estabilidad. Son ampliamente utilizados debido a su menor costo, facilidad de preparación y menor impacto ambiental en comparación con otros sistemas. En perforación diamantina, permiten transportar los recortes, refrigerar la broca y contribuir a la estabilidad del pozo.

Utilizan agua dulce, salobre ó salada como fase continua. Son los más económicos, fáciles de preparar y de menor impacto ambiental. Se subdividen en:

- Sistemas no inhibidos (para formaciones estables y poco profundas) y

- Sistemas inhibidos (tratados con sales, potasio o polímeros para evitar la expansión de arcillas reactivas) o Sistemas No Inhibidos (Naturales y de bajo sólidos): Preparados habitualmente con agua y arcillas nativas (lodos spud) o Bentonita básica para formaciones superficiales estables, es decir, al inicio de la perforación.
- Sistemas Inhibidos y Poliméricos: Tratados con aditivos específicos para reducir la reactividad de las arcillas expansivas
- Sistemas al Cloruro de Potasio (KCl): Utilizados para suprimir el hinchamiento y desprendimiento de lutitas y arcillas reactivas.
- Sistemas con Polímeros Encapsuladores: Incorporan productos como poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas (PHPA) ej. AMC CR-650 para encapsulación de recortes y proteger las paredes del pozo.
- Sistemas con polímeros inhibidores: Se utiliza polímeros en base a aminas, que generalmente vienen en presentaciones líquidas a diferencia del Cloruro de potasio

Fluidos base aceite (OBM – Oil Based Mud)

Son fluidos cuya fase continua es un aceite, mientras que el agua puede encontrarse como fase dispersa. Presentan una buena estabilidad frente a temperaturas elevadas, formaciones reactivas y condiciones de perforación exigentes. Además, ofrecen excelentes propiedades de lubricación y control de filtrado. Sin embargo, su uso implica mayores costos y consideraciones ambientales debido a la presencia de hidrocarburos.

Tienen como fase continua un aceite (como diésel, aceite mineral o parafina). Ofrecen excelente lubricidad, estabilidad a altas temperaturas y control superior en formaciones arcillosas problemáticas.

- Lodos a base de diésel: Sistemas tradicionales donde la fase continua es un destilado de petróleo: diésel; ofrecen gran lubricidad, pero restricciones ambientales crecientes.
- Lodos con aceite mineral: Emplean aceites minerales altamente refinados con menor contenido aromático para reducir la toxicidad en comparación con el diésel puro.
- Lodos con aceite de parafina: Formulados con parafinas lineales o isoparafinas, altamente esta-

bles y utilizados en perforaciones profundas o de alta temperatura/alta presión (HTHP).

Ventajas de los OBM frente a los WBM:

Los lodos base aceite (OBM) se emplean en situaciones complejas de perforación donde los sistemas base agua tradicionales fallan o comprometen la estabilidad del pozo.

- Formaciones de arcillas o lutitas altamente reactivas.
- Pozos profundos y de alta temperatura y presión (HTHP).
- Pozos direccionales, horizontales y de alcance extendido.
- Perforación y evaluación de zonas productoras sensibles.
- Ambientes con alta concentración de contaminantes

Fluidos base sintéticos (SBM – Synthetic Based Mud)

Son sistemas similares a los fluidos base aceite, pero utilizan fluidos sintéticos como fase continua. Fueron desarrollados para obtener buenas propiedades de lubrica-

ción, estabilidad y desempeño a altas temperaturas, reduciendo algunos de los impactos ambientales asociados a los OBM convencionales. Son utilizados principalmente en operaciones donde se requieren altas prestaciones técnicas.

Utilizan como fase continua fluidos derivados de síntesis química (como olefinas, ésteres o éteres). Brindan un rendimiento técnico muy similar al de los fluidos base aceite, pero con una menor toxicidad y mayor biodegradabilidad, siendo el estándar en operaciones costa afuera (offshore).

- Lodos de olefinas (Internal Olefins): Derivados sintéticos muy comunes que ofrecen excelente biodegradabilidad marina y menor toxicidad.
- Lodos de ésteres: Compuestos sintetizados a partir de ácidos grasos y alcoholes, destacados por su rápida degradación en entornos marinos.
- Lodos de acetales o éteres: Fluidos sintéticos especializados diseñados para mantener la estabilidad térmica en pozos costa afuera complejos.

Fluidos gaseosos o neumáticos

Son sistemas de perforación en los que se utiliza aire, gas o espuma como medio principal de circulación, en lu-

gar de un fluido líquido convencional. Permiten obtener altas velocidades de penetración y una rápida evacuación de los recortes, especialmente en formaciones competentes y con bajos niveles de presión de formación. Sin embargo, presentan limitaciones en formaciones inestables, con presencia de agua o cuando se requiere un mayor control de las paredes del pozo.

Consisten en aire seco, gas natural, niebla, aire aireado o espumas. Se emplean en formaciones con presiones de formación muy bajas o de pérdida severa, donde los lodos líquidos convencionales fracturarían la roca o dañarían la zona productora.

- Aire seco: Inyección directa de aire a alta velocidad mediante compresores, utilizado en formaciones duras, secas y con presiones de formación muy bajas.
- Niebla (Mist drilling): Aire comprimido mezclado con una pequeña cantidad de agua y agentes espumantes o surfactantes para ayudar a acarrear la humedad y los recortes ligeros.
- Espumas (Foam drilling): Mezclas estables de aire, agua y altas concentraciones de agentes espumantes y polímeros, capaces de transportar recortes de mayor tamaño en pozos con problemas de pérdida de circulación

Glosario de términos básicos

- **Trépano**

Es la herramienta de corte localizado en el extremo inferior de la sarta de perforación que se utiliza para cortar o triturar la formación durante el proceso de perforación rotatoria.

- **Perforación diamantina**

Es un método de exploración minera que permite hacer el sondaje de formaciones geológicas, mediante la perforación de roca y suelo con el uso de brocas diamantadas de diferentes diámetros y durezas para la posterior obtención, registro, y almacenamiento de muestras llamadas testigos.

- **Testigo de perforación**

Muestra cilíndrica, continua, conformada por materiales que corta la corona diamantada de la perforación, es a esta muestra a la que se le pueden realizar ensayos de laboratorio (mecánica de rocas y mecánica de suelos), también es posible describir sus parámetros litológicos, geotécnicos mediante logueo

- **Aditivos**

Es un diluyente polimérico térmicamente estable y altamente eficaz, quita las arcillas bentoníticas de la sarta de perforación y dispersa los anillos de arcillas ayudando a liberar la tubería que se encuentra atascada.

- **Bentonita**

Un material compuesto por minerales de arcilla, principalmente montmorillonita con cantidades escasas de otros minerales del grupo de las esmectitas. La principal característica es que absorbe varias veces su peso en agua y tiene excelentes propiedades coloidales, lo que la vuelve excelente recurso para la preparación de lodos de perforación.

- **Circulación**

Movimiento continuo del fluido de perforación desde la superficie hacia el fondo del pozo y regreso por el espacio anular, permitiendo el transporte de recortes y la refrigeración de la broca.

- **Filtrado API**

Volumen de fluido que atraviesa un medio filtrante bajo condiciones estandarizadas (30 minutos). Indica la capacidad del lodo para invadir la formación y la calidad del revoque formado

- **Formación**

Conjunto de rocas o estratos geológicos atravesados durante la perforación. Su litología influye en la reología requerida del lodo.

- **Lodo convencional**

Fluido de perforación preparado con bentonita y aditivos básicos, sin control técnico riguroso ni tratamiento previo del agua base

- Lodo mejorado

Fluido formulado con aditivos especializados (PAC, polímeros, goma xántica, lubricantes) y agua tratada, diseñado para optimizar la reología, reducir filtrado y mejorar la estabilidad del pozo.

- Pérdida de circulación

Fenómeno en el cual el fluido de perforación se infiltra en la formación debido a fracturas, porosidad elevada o revoque deficiente.

- Revoque

Capa delgada y de baja permeabilidad formada por sólidos del lodo sobre la pared del pozo. Reduce el filtrado y estabiliza la formación.

Marco referencial

- Ley general del ambiente, Ley N° 28611
- La ley General del Ambiente establece los principios rectores de la política ambiental en el Perú, entre ellos la prevención, sostenibilidad y responsabilidad ambiental. en el contexto de la perforación diamantina, esta ley exige que las operaciones minimicen los impactos sobre el suelo, agua y ecosistemas, lo cual incluye el manejo adecuado de fluidos de perforación, la prevención de derrames y la gestión responsable de residuos

generados durante la actividad exploratoria.

- Ley general de minería, Decreto Supremo N°014-92-EM
- Este decreto regula las actividades en el país, estableciendo obligaciones relacionadas con la seguridad operativa, la protección ambiental y el uso adecuado de insumos. En el ámbito de la perforación diamantina, esta norma exige que las operaciones se ejecuten con equipos y materiales adecuados, incluyendo fluidos de perforación que garanticen la estabilidad del pozo y la integridad de las instalaciones. Asimismo, establece responsabilidades sobre el manejo de sustancias químicas y la prevención de riesgos operacionales.
- Ley que regula los pasivos ambientales, Ley N° 28271
- Esta ley define los pasivos ambientales mineros y establece obligaciones para su identificación, mitigación y remediación. En relación con los fluidos de perforación, la norma enfatiza la necesidad de evitar prácticas que generen contaminación del suelo o cuerpos de agua, así como la correcta disposición de lodos residuales y recortes. La formulación de lodos con menor impacto

ambiental contribuye directamente a la reducción de futuros pasivos.

- Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera, Decreto Supremo N°042-2017-EM
- Este reglamento establece los lineamientos para la gestión ambiental en actividades de exploración, incluyendo perforación diamantina. Regula:
 - El manejo de efluentes y lodos,
 - La prevención de contaminación por aditivos químicos,
 - El control de emisiones y descargas
 - La gestión de residuos sólidos y peligrosos
- Estándares API para fluidos de perforación (API RP 13B-1 y API RP 13D). Los estándares del American Petroleum Institute (API) constituyen la referencia técnica más utilizada a nivel mundial para la evaluación de propiedades reológicas y de control de filtrado en fluidos de perforación. Entre los documentos mpas relevantes destacan.
 - API RP 13B-1: procedimientos para medir viscosidad Marsh, VP, YP, geles y filtrado API

- API RP 13D: principios hidráulicos para optimizar limpieza del pozo y transporte de recortes
- Lineamientos de perforación diamantina en minería (Normas ISO 22475-1 e ISO 14688) Las normas ISO relacionadas con perforación y muestreo geotécnico establecen criterios para:
 - Estabilidad del pozo
 - Calidad del testigo
 - Control de fluidos
 - Procedimientos de perforación

Cimientos conceptuales que orientan la indagación

El eje articulador de la propuesta

La incorporación de aditivos y tecnologías de fluidos de perforación desarrolladas en la industria petrolera en la formulación de lodos para perforación diamantina permite minimizar significativamente los problemas operacionales que afectan la estabilidad del pozo y la continuidad de las operaciones. Esta mejora se manifiesta en la reducción de atascamientos, la disminución de pérdidas de circulación, la prevención de fallas en los equipos y el incremento de la eficiencia general del proceso de perfo-

ración. La adaptación de estas tecnologías, previamente validadas en condiciones operativas más exigentes, constituye una vía efectiva para superar las limitaciones que han caracterizado históricamente el manejo empírico de los fluidos en la minería diamantina, estableciendo un nuevo estándar de desempeño basado en el control técnico y la optimización de las propiedades reológicas.

Los pilares que sostienen la propuesta

Una formulación del fluido de perforación diseñada en función de las características litológicas del terreno que se está perforando proporciona una mayor estabilidad del pozo, mejora la limpieza del sondaje y contribuye a obtener una perforación más segura y eficiente. La adaptación de la formulación a las condiciones específicas de cada tipo de formación, ya sea roca compacta, fracturada, arenosa o mineralizada, permite optimizar el desempeño del fluido y reducir los problemas operacionales asociados a la inestabilidad del pozo. Esta correspondencia entre las propiedades del lodo y las condiciones geológicas constituye un principio fundamental para garantizar la efectividad de la perforación en entornos complejos.

Los datos de monitoreo obtenidos durante la operación constituyen la base para determinar el tipo y la concentración de aditivos que deben incorporarse en la formula-

ción del fluido de perforación. La información recopilada en campo sobre propiedades como pH, viscosidad Marsh, viscosidad plástica, punto cedente, resistencia de gel y filtrado API permite identificar las deficiencias del lodo y establecer los ajustes necesarios para mejorar su reología. Este proceso de retroalimentación continua entre el monitoreo y la formulación asegura que el fluido mantenga las propiedades óptimas a lo largo de toda la operación, adaptándose a las cambiantes condiciones del subsuelo.

El monitoreo constante del fluido de perforación durante la operación proporciona un panorama general del rendimiento actual del sistema y permite detectar oportunamente cualquier desviación en sus propiedades. La medición periódica de los parámetros reológicos y de filtración, siguiendo estándares internacionales como la norma API RP 13B-1, garantiza que el fluido mantenga las condiciones adecuadas para el transporte de recortes, la estabilización del pozo y la refrigeración de la broca. Esta vigilancia continua constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones operativas y para la prevención de problemas antes de que se materialicen en fallas o incidentes.

La mejora en la formulación del fluido de perforación se traduce en una operación con menores riesgos operacionales y una mayor eficiencia en términos de avance, duración de herramientas y reducción de tiempos improducti-

vos. La incorporación de aditivos especializados como el PAC, la goma xántica y los controladores de pH permite obtener un fluido con propiedades reológicas óptimas, capaces de superar las limitaciones del lodo convencional y de responder a los desafíos geológicos que caracterizan al yacimiento. Esta mejora se refleja en indicadores concretos como el incremento de la velocidad de penetración, la reducción del torque, la extensión de la vida útil de la broca y la disminución de los eventos de atrapamiento.

Capítulo 3

*El diseño de la indagación y su fundamentación
metodológica*

El sendero operativo de la indagación

El universo de este estudio abarca al fluido de perforación utilizado en todas las máquinas perforadoras activas en el yacimiento minero Antamina, ubicado en el distrito de San Marcos de la provincia de Huari, departamento de Áncash. Se trata de un conjunto de siete máquinas perforadoras que operan en diferentes fases del proyecto, cada una de ellas con condiciones geológicas específicas y con requerimientos particulares de fluido de perforación que deben ser atendidos de manera diferenciada. La caracterización de este universo resulta fundamental para comprender la diversidad de situaciones operativas que deben ser cubiertas por la formulación propuesta y para garantizar que los resultados obtenidos sean representativos de las condiciones reales de operación en la unidad minera. La selección de las máquinas no fue aleatoria, sino que respondió a criterios técnicos que permitieron asegurar la comparabilidad de los datos y la validez de las conclusiones.

Tabla 2. Máquinas perforadoras y perforista

Máquina	Perforista
AKD 02	AKDrilling
AKD 22	AKDrilling
LF230 01	Explomin
LF230 01A	Explomin
LF230 02	Explomin

Máquina	Perforista
LF230 04	Explomin
LF230 05	Explomin

Nota: Juárez Ramos (2026).

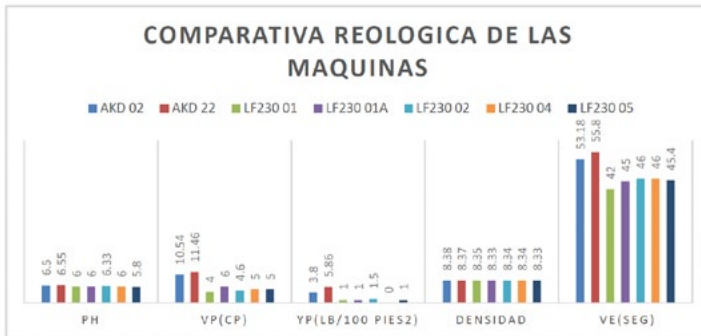
La población está representada por solo una máquina por fase de mina con el fin de dar un mejor seguimiento de la calidad del lodo y las fórmulas empleadas en cada una de ellas. Esta decisión metodológica responde a la necesidad de garantizar un control riguroso sobre las variables que afectan el desempeño del fluido, evitando la dispersión de datos que podría generar la inclusión de múltiples equipos con condiciones operativas heterogéneas que dificultarían la interpretación de los resultados. Al seleccionar una máquina representativa por cada fase, se asegura que las observaciones y mediciones realizadas sean comparables entre sí y que los resultados puedan atribuirse con claridad a las modificaciones introducidas en la formulación del lodo, eliminando el ruido que podrían introducir variaciones no controladas. Siendo así, fueron escogidas las máquinas que se detallan a continuación, las cuales operan en las fases F9 RT, F9 A, F9 RT, F9 S, F9 S, F7 y F9 RT, respectivamente, cubriendo así una variedad de condiciones litológicas que permite evaluar el desempeño del fluido en diferentes tipos de terreno.

Tabla 3. Población de máquinas evaluadas

Máquina	Sondaje	Perforista	Fase
AKD 02	A3974	AKDrilling	F 9 RT
AKD 22	A3973	AKDrilling	F 9 A
LF230 01	A3961	Explomin	F 9 RT
LF230 01A	A3952	Explomin	F 9 S
LF230 02	A3978	Explomin	F 9 S
LF230 04	A3979	Explomin	F7
LF230 05	A3975	Explomin	F 9 RT

Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 6. Análisis general de cada maquina



La muestra se determinó seleccionando una máquina de perforación representativa por cada empresa contratista que opera en la unidad minera, lo que permitió capturar las particularidades de cada equipo y las variaciones en la preparación del fluido que podrían influir en su comportamiento reológico y en el éxito del sondaje.

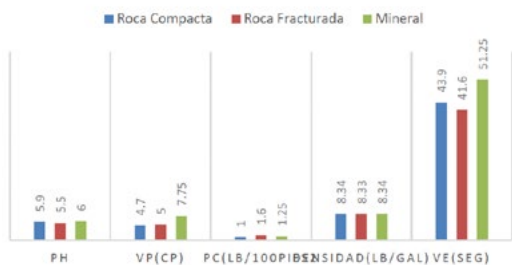
Esta selección se basó en criterios de accesibilidad a datos, continuidad operativa y representatividad técnica de las condiciones habituales de perforación diamantina en la zona, asegurando que las máquinas seleccionadas reflejaran las condiciones reales de operación y no situaciones excepcionales que podrían distorsionar los resultados. De este modo, cada equipo fue considerado como una unidad de análisis independiente, permitiendo evaluar el desempeño del lodo de perforación desde el inicio del sondaje hasta la finalización, y estableciendo comparaciones válidas entre las diferentes formulaciones evaluadas.

Tabla 4. Tabla de muestras seleccionadas y su análisis general

Promedio de analisis																
Pozo	Son- daje	Perfo- rista	Fase	Nivel	VE (seg)	VP	PC / YP	GE- LES 10"	GE- LES 10'	GE- LES 30	Re- vo- que	Filtra- do	Den- si- dad	Are- na	So- li- dos	PH
LF230 05	A3975	Explo- min	Fase 9 RT	28.70%	45.4	5	1	2.3	2.2	2.2	1	295	8.33	0.15	0.5	5.8
	Roca Compacta			29%	43.9	4.7	1	2.4	2.2	2.2	1	295	8.34	0.12	0.5	5.9
	Roca Fracturada			25%	41.6	5	1.6	1.3	1.3	1.3	1	300	8.33	0.23	0.5	5.5
	Mineral			25.75%	51.25	7.75	1.25	3.25	3.25	3.25	1	306	8.34	0.38	0.5	6
AKD 22	A3973	AKDrilling	Fase 9 ALTA	23%	55.8	11.46	5.86	10.5	10	10	1	305.75	8.37	0.15	0.5	6.55
	Arena			27%	62	11.33	7	8.3	7.3	7.3	1	360	8.4	0.13	0.5	6.83
	Mineral			18%	52.5	11	9.5	16.5	16.5	16.5	1	360	8.4	0.15	0.5	6
	Roca Compacta			29%	54.84	8.3	5	6.75	6.16	6.16	1	273.2	8.36	0.14	0.5	6.87
	Roca Fracturada			19%	50.54	15	5.8	14	13.7	13.7	1	360	8.4	0.15	0.5	6.27

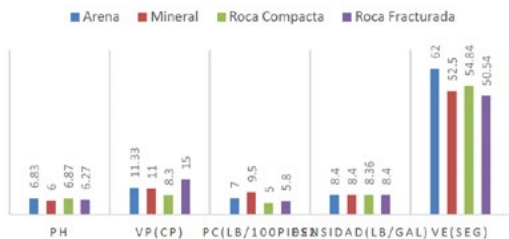
Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 7. Gráfico de barras de comparativa general del lodo – LF230 05



Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 8. Gráfico de barras de comparativa general del lodo – AKD 22



Nota: Juárez Ramos (2026).

Esta estrategia busca capturar las particularidades operativas y las variaciones en la preparación del fluido que podrían influir en su comportamiento reológico y en el éxito del sondaje, con el fin de identificar mejoras técnicas aplicables y replicables que permitan optimizar la eficiencia del fluido de perforación, reducir pérdidas de circulación y mejorar la recuperación de testigos, contribuyendo a una mejor toma de decisiones operativas y a la reducción de riesgos en campañas exploratorias futu-

ras. La selección de las máquinas respondió también a la disponibilidad de información histórica sobre su desempeño, lo que permitió establecer una línea base para la comparación entre el lodo convencional y la formulación mejorada, así como para evaluar la magnitud de las mejoras obtenidas en términos de reducción de tiempos improductivos y aumento de la eficiencia operativa.

El procedimiento para la identificación de problemas a través del diagnóstico del lodo se estructuró en seis pasos secuenciales que permitieron caracterizar la situación inicial y establecer las bases para el diseño de la nueva formulación. En primer lugar, se movilizó al proyecto un laboratorio móvil que permitió realizar el diagnóstico de las propiedades del fluido de perforación en el sitio de operaciones, reduciendo los tiempos de espera y facilitando la obtención de datos en tiempo real que pudieran orientar las decisiones operativas de manera inmediata. En segundo lugar, se movilizó al proyecto técnicos especialistas en fluidos de perforación para liderar el diagnóstico a través de ensayos con muestras tomadas de los tanques de mezclado, asegurando que los procedimientos de medición se realizaran conforme a los estándares internacionales y que los resultados obtenidos fueran confiables y comparables con los reportados en la literatura técnica. En tercer lugar, se realizó un levantamiento de data inicial, tomando muestras aleatorias de los sondeos en ejecución en las

diferentes fases del proyecto, lo que permitió obtener una visión panorámica de las condiciones del fluido en distintas etapas de la operación y en diferentes tipos de terreno.

En cuarto lugar, se escogió un sondaje para cada fase del proyecto y se obtuvo data correlacionando así los diferentes tipos de terreno que se presentan, lo que permitió identificar las relaciones entre las propiedades del lodo y las condiciones litológicas específicas de cada fase, estableciendo patrones que pudieran orientar el diseño de formulaciones específicas para cada tipo de formación. En quinto lugar, se escogió un sondaje específico de cada socio de perforación para obtener data a medida que se profundizaba en las diferentes zonas litológicas, lo que facilitó la caracterización de la variabilidad del fluido en función de la profundidad y del tipo de roca atravesada, permitiendo identificar los cambios en las propiedades del lodo que se producían como consecuencia de las condiciones cambiantes del subsuelo. Finalmente, se procesó la data obtenida y se entregó tanto a Antamina como a los socios de perforación los resultados obtenidos junto con conclusiones y propuestas de mejora, estableciendo un canal de retroalimentación que permitió validar los hallazgos con los actores involucrados en la operación y asegurar que las recomendaciones fueran pertinentes y aplicables en el contexto real de trabajo.

Durante un periodo de dos meses se realizó la colecta de muestras de fluido de perforación de cada uno de los sondeos, además de monitorear en campo el tiempo de Stand by que se tuvo a causa del acondicionamiento de sondeo, la pega de tubería, la obturación y la pérdida de nivel. Estas actividades de campo permitieron no solo caracterizar las propiedades del fluido, sino también cuantificar el impacto de los problemas operacionales en términos de tiempo perdido y costos asociados, estableciendo una relación directa entre las deficiencias del lodo y los retrasos en la operación. Las pruebas de laboratorio se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en la norma API RP 13B-1 (2023), que constituye la referencia técnica más utilizada a nivel mundial para la evaluación de propiedades reológicas y de control de filtrado en fluidos de perforación. La combinación de mediciones de campo y laboratorio permitió construir una base de datos robusta que sustenta las conclusiones de la investigación y que puede ser utilizada como referencia para futuras investigaciones en el campo de los fluidos de perforación diamantina.

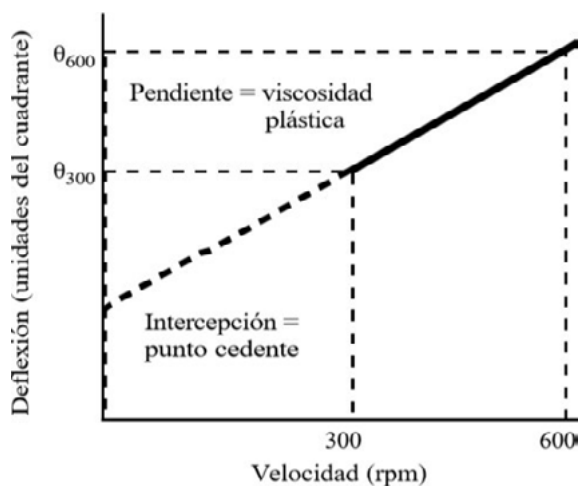
Las pruebas de campo y laboratorio incluyeron la medición de densidad del fluido en una balanza de lodo de suficiente precisión con un margen de error de 0.1 lb/gal, lo que permitió verificar que la densidad del lodo se mantuviera dentro de los rangos requeridos para garantizar la estabilidad del pozo y evitar problemas de control de pre-

siones. La viscosidad se midió con viscosímetro de Marsh, empleando un embudo de Marsh para la medición de viscosidad del lodo en el trabajo rutinario de campo, con un diámetro de 6 pulgadas en la parte superior y una longitud de 12 pulgadas, lo que permitió obtener una indicación rápida del comportamiento de flujo del fluido y de su capacidad de circulación durante la perforación, así como detectar variaciones que pudieran indicar problemas en la preparación del lodo o contaminación del mismo.

El esfuerzo de gel se determinó agitando la muestra a 600 RPM durante 15 segundos, luego dejando estático el fluido y esperando 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos respectivamente para anotar los valores en el cuadrante del viscosímetro. Esta prueba permitió evaluar la capacidad del lodo para desarrollar estructura durante los periodos de reposo y mantener los recortes en suspensión, lo que constituye un parámetro crítico para la estabilidad del pozo durante las interrupciones de la circulación que se producen inevitablemente durante las operaciones de perforación. La filtración se determinó utilizando filtro de prensa, midiendo la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través del papel filtro y luego midiendo el espesor de revoque sólido que se asentó en el papel, lo que permitió evaluar la capacidad del lodo para controlar la pérdida de fase líquida hacia la formación y la calidad del revoque formado, que constituye una barrera protectora para las paredes del pozo.

El contenido de arenas se calculó utilizando una malla de arena y un tubo graduado de laboratorio, considerando que el contenido de arena se ve de 0 al 20% en el tubo graduado y que la cantidad óptima debe ser de menos de 1% de contenido de arena dentro del fluido de perforación. La concentración iónica de hidrógeno se midió utilizando tiras indicadoras de pH (Papel pH), que están revestidas con indicadores cuyo color depende del pH del fluido donde se introducen, lo que permitió verificar que el pH del lodo se mantuviera dentro del rango recomendado para garantizar la efectividad de los aditivos y evitar problemas de corrosión en los equipos.

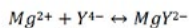
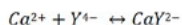
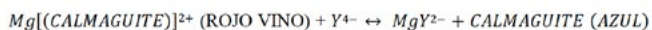
Figura 9. Gráfica del comportamiento del YP y VP



Nota: Juárez Ramos (2026).



Usando una pipeta se valoró con la solución de versenato estandar – EDTA, ácido etilendiaminotetraacético, compuesto químico usado como agente quelante. Se agitó la solución hasta que la muestra se volvió azul y se registró el número de ml de solución EDTA usada.



$$Ca + 2 \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{ml \text{ de Versenato Estándar} \times 400}{ml \text{ de muestra}}$$

Figura 10. Determinación de la dureza



Nota: Juárez Ramos (2026).

La determinación de cloruros se realizó mediante titulación con nitrato de plata, utilizando diferentes normalidades según la concentración iónica de cloruro del filtrado. Si la concentración iónica de cloruro del filtrado es inferior a 10,000 mg/L, se utiliza la solución de nitrato de plata 0.0282 N equivalente a 0.001 g de ion Cl por ml, calculándose la concentración como $\text{Cl}^- \text{ (mg/L)} = \text{ml de AgNO}_3 \text{ 0.0282 N} \times 1,000 / \text{ml de filtrado}$. Si la concentración iónica de cloruro del filtrado es mayor de 10,000 mg/L, se utiliza el nitrato de plata 0.282 N equivalente a 0.01 g de ión Cl por ml, calculándose la concentración como $\text{Cl}^- \text{ (mg/L)} = \text{ml de AgNO}_3 \text{ 0.282 N} \times 10,000 / \text{ml de filtrado}$. Para cualquier normalidad de nitrato de plata, la concentración se calcula como $\text{Cl}^- \text{ (mg/L)} = \text{N} \times 35,000 \times \text{ml utilizado} / \text{ml de muestra de filtrado}$.

La determinación de la dureza del agua se realizó colocando 20 ml de agua en el recipiente de valoración, luego se añadió 1 ml de muestra de agua, se añadió 1 ml de solución amortiguadora (NH_4OH) y posteriormente se añadieron 6 gotas de calmaguite, una sustancia que cambia de color en presencia de iones metálicos y que permite determinar la concentración de estos iones en una solución. Usando una pipeta se valoró con la solución de versenato estándar EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), compuesto químico usado como agente quelante. Se agitó la solución hasta que la muestra se volvió azul y se registró el número de ml de solución EDTA usada. La concentración de calcio

se calculó como $\text{Ca} + 2 \text{ (mg/L)} = (\text{ml de Versenato Estándar} \times 400) / \text{ml de muestra}$.

Los instrumentos y las consideraciones éticas de la indagación

Las herramientas utilizadas para la recopilación y gestión de información de gabinete incluyeron bases de datos académicas como Google Académico, Science Direct, Scielo y Alicia Concytec, que permitieron acceder a la literatura científica especializada sobre fluidos de perforación, reología y operaciones mineras, así como a estudios de caso y experiencias documentadas en otras unidades mineras que pudieran servir como referencia para el diseño de la formulación propuesta. Se utilizaron también herramientas de recopilación de datos como cuestionarios, grabadoras de audio para entrevistas y software de transcripción para convertir las grabaciones en texto, lo que facilitó la documentación sistemática de las observaciones de campo y las entrevistas con el personal técnico, permitiendo capturar no solo los datos numéricos sino también las percepciones y experiencias de los operadores que tienen un conocimiento profundo de las condiciones reales de trabajo.

Para el análisis de datos se consideraron software especializados como Nvivo o Atlas.ti, que permiten el procesa-

miento de información cualitativa y cuantitativa, así como software de gestión de referencias como EndNote o Mendeley para organizar y citar la literatura utilizada en la investigación. Se emplearon además herramientas de organización y planificación como Google Calendario para la gestión del tiempo y la coordinación de las actividades de campo y laboratorio, así como herramientas de escritura y presentación como Microsoft Word para el procesamiento de texto y Microsoft PowerPoint para la presentación de los hallazgos. Las técnicas y herramientas utilizadas para la obtención de datos de laboratorio incluyeron la norma API RP 13B-1 (2023), el embudo de Marsh, el viscosímetro rotativo, el filtro API, la malla de arena, el tubo graduado y el papel pH, cada uno de los cuales permitió medir parámetros específicos del fluido de perforación y evaluar su desempeño en condiciones controladas.

Los aspectos éticos fueron considerados de manera transversal en todas las fases de la investigación, reconociendo que la producción de conocimiento científico conlleva una responsabilidad significativa frente a la comunidad académica, la industria y la sociedad en su conjunto. La presente investigación se desarrolló bajo principios de integridad, responsabilidad y honestidad científica, procurando que cada una de las etapas del estudio se realizara de manera transparente y objetiva. Se garantizó que los métodos, procedimientos experimentales, materiales utilizados y resultados obtenidos fueran presentados de forma clara y

coherente, evitando la alteración, manipulación, omisión o fabricación de información que pudiera afectar la validez de la investigación. Asimismo, los resultados obtenidos durante la caracterización del agua, evaluación de las propiedades del fluido de perforación y aplicación de las formulaciones propuestas fueron registrados y analizados de acuerdo con los procedimientos establecidos para el desarrollo del estudio, y las conclusiones fueron elaboradas a partir de la evidencia experimental obtenida, evitando realizar afirmaciones que no pudieran ser sustentadas por los resultados de la investigación.

En relación con la información bibliográfica empleada, se respetaron los derechos de autor y la propiedad intelectual, reconociendo adecuadamente las fuentes utilizadas mediante las respectivas referencias y citas. De esta manera, se evitó el plagio y se garantizó que los aportes de otros investigadores, autores y organizaciones fueran reconocidos de manera apropiada, contribuyendo así a la integridad del proceso investigativo y al reconocimiento del trabajo de quienes han contribuido al avance del conocimiento en el campo de los fluidos de perforación. Del mismo modo, la investigación consideró la responsabilidad en el manejo de la información obtenida durante las actividades de campo y laboratorio. Los datos correspondientes a las operaciones de perforación, ensayos y evaluaciones fueron utilizados exclusivamente con fines académicos y de investigación, manteniendo una presen-

tación objetiva de la información y respetando las condiciones establecidas para su utilización, así como la confidencialidad de la información sensible de la empresa.

Finalmente, la presente investigación buscó generar un aporte técnico y académico mediante la evaluación experimental de tecnologías de fluidos de perforación aplicables a la perforación diamantina. Los resultados obtenidos tienen el potencial de contribuir al conocimiento y a la optimización del proceso, especialmente en aspectos relacionados con las propiedades del fluido, control de la filtración, estabilidad del pozo y desempeño operativo. En este sentido, se busca que los conocimientos generados puedan servir como referencia para futuras investigaciones y para el desarrollo de alternativas que permitan mejorar las condiciones y eficiencia de la perforación diamantina, considerando también un uso responsable de los recursos y una adecuada gestión de los posibles impactos asociados al proceso. La investigación aspira a establecer un puente entre el conocimiento generado en la industria petrolera y su aplicación en el contexto minero, promoviendo la transferencia tecnológica y la innovación en un sector estratégico para el desarrollo del país.

Capítulo 4

Los hallazgos y su significado para la operación minera

La caracterización del agua base y los lodos por máquina y fase

La caracterización del agua base utilizada en la preparación del lodo de perforación reveló parámetros críticos que afectan el desempeño de los aditivos y que explican en gran medida los problemas observados con el lodo convencional. Los resultados del análisis fisicoquímico mostraron valores de cloruros entre 125 y 150 mg/L, dentro del límite recomendado de menos de 1000 mg/L, pero con una dureza total (como CaCO_3) de 300 a 380 mg/L, muy por encima del límite recomendado de menos de 150 mg/L y del valor crítico de 240 a 300 mg/L. Esta dureza elevada interfiere con la hidratación de la bentonita y la eficiencia de los polímeros, lo que se traduce en un consumo excesivo de aditivos y en un desempeño deficiente del fluido, afectando directamente la capacidad del lodo para cumplir sus funciones de transporte y estabilización en el sondaje.

Tabla 5. Problemática de los lodos convencionales en perforación diamantina

ASPECTO CRÍTICO	CONDICIÓN OBSERVADA	IMPACTO OPERACIONAL
• Suspensión de recortes	Baja VP, YP y gel Alto	Decantación de sólidos, aumento de torque y arrastre
• Pérdidas de circulación	> 50 % entre 500–1000 m +50 % Crítico	Presión diferencial, atrapamientos de tubería
• Filtrado y revoque	Filtrado elevado, revoque fino Alto	Daño a la formación, inestabilidad del pozo
• Enfriamiento y lubricación	Deficiente Alto	Quemado prematuro de broca, desgaste acelerado
• Torque	Elevado Medio-alto	Mayor esfuerzo mecánico y tiempos improductivos
• Calidad del agua base	Ácida y dura Medio	Floculación, baja eficiencia de bentonita y polímeros
• Preparación del lodo	Mezcla empírica sin control técnico Alto	Variabilidad reológica y fallas operativas
• Eventos críticos	Tubería atrapada, rotura de wireline Crítico	Paradas no programadas y riesgos operacionales

Nota: elaboración propia

La caracterización del agua base y los lodos por máquina y fase

La caracterización del agua base utilizada en la preparación del lodo de perforación reveló parámetros críticos que afectan el desempeño de los aditivos y que explican en gran medida los problemas observados con el lodo convencional. Los resultados del análisis fisicoquímico mostraron valores de cloruros entre 125 y 150 mg/L, dentro del límite recomendado de menos de 1000 mg/L, pero con una dureza total (como CaCO₃) de 300 a 380 mg/L, muy por encima del límite recomendado de menos de 150

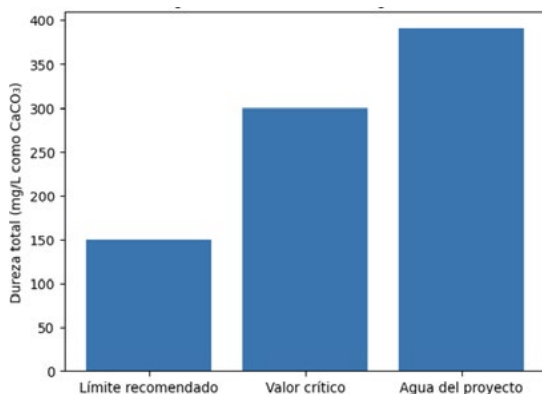
mg/L y del valor crítico de 240 a 300 mg/L. Esta dureza elevada interfiere con la hidratación de la bentonita y la eficiencia de los polímeros, lo que se traduce en un consumo excesivo de aditivos y en un desempeño deficiente del fluido, afectando directamente la capacidad del lodo para cumplir sus funciones de transporte y estabilización en el sondaje.

Tabla 6. Resultados del análisis fisicoquímico del agua base

PARÁMETRO DEL AGUA	LÍMITE RECOMENDADO (MG/L)	VALORES CRÍTICOS (MG/L)	RESULTADO EN EL PROYECTO (MG/L)
Cloruros (Cl ⁻)	< 1,000 Recomendado	> 5,000 – 10,000 Crítico	125 – 150 OK
Dureza total (como CaCO ₃)	< 150 Recomendado	> 240 – 300 Crítico	300 – 380 Excede

Nota: elaboración propia

Figura 11. Dureza del agua base



Nota: Juárez Ramos (2026).

Durante el desarrollo de la presente investigación, se recopilaron datos en campo provenientes de siete máquinas de perforación diamantina activas en la unidad minera, cubriendo las diferentes fases del proceso de perforación y los distintos tipos de terreno que se presentan en la operación. Se consideraron las diferentes fases del proceso de perforación: collar, avance intermedio y fase final, con el objetivo de identificar las variaciones en las propiedades del lodo en función de la configuración operativa y del tipo de aditivos utilizados en cada etapa. Cada muestra fue recolectada directamente desde el mixer de lodo, siguiendo las recomendaciones del estándar API RP 13B-1 (2023) para lodos base agua. Las propiedades evaluadas fueron: pH, viscosidad Marsh, YP, VP, volumen de filtrado API, densidad y observaciones de estabilidad o contaminación, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 7. Propiedades de lodos totales

MÁQUINA	SONDAJE	PERFORISTA	FASE	VE (SEG)	VP	PC / YP	GELES 10"	GELES 10"	GELES 30"	REVOQUE	FILTRADO	DENSIDAD	ARENA	SÓLIDOS	PH
AKD 02	A3974	AKDrilling	FFRT	53.18	10.54	3.8	7.18	6.36	6.36	1	303.6	8.38	0.15	0.5	6.5
AKD 22	A3973	AKDrilling	FFA	55.8	11.46	5.86	10.5	10	10	1	305.75	8.37	0.15	0.5	6.55
LF230 01	A3961	Exploimin	FFRT	42	4	1	2	2	2	1	310.4	8.35	0.3	0.5	6
LF230 01A	A3952	Exploimin	FFS	45	6	1	2	2	2	1	297.2	8.33	0.3	0.5	6
LF230 02	A3978	Exploimin	FFS	46	4.6	1.5	2.7	2.3	2.3	1	315.3	8.34	0.12	0.4	6.33
LF230 04	A3979	Exploimin	FF	46	5	0	2	2	2	1	305	8.34	0.4	0.5	6
LF230 05	A3975	Exploimin	FFRT	45.4	5	1	2.3	2.2	2.2	1	295	8.33	0.15	0.5	5.8
Promedio general				47.63	6.66	2.82	4.10	3.84	3.84	1.00	304.61	8.35	0.22	0.49	6.17

Nota: elaboración propia

La comparación reológica entre el lodo convencional y el lodo mejorado se realizó en dos pozos representativos: AKD-22 y LF230-05, seleccionados por su representatividad de las condiciones operativas y geológicas de la unidad minera. En el caso del pH, los resultados obtenidos evidencian una diferencia significativa entre el lodo convencional y la formulación mejorada, lo que demuestra la importancia del control químico en la preparación del fluido. El lodo convencional presentó valores de pH entre 5.0 y 6.0, ubicándose por debajo del rango recomendado de 8.0 a 9.5 para el adecuado desempeño del fluido de perforación. Estos valores indican un sistema ligeramente ácido, condición que puede afectar la estabilidad y el comportamiento de los aditivos incorporados al lodo, además de favorecer procesos de corrosión en los componentes metálicos del sistema de perforación. En contraste, la formulación mejorada presentó valores de pH entre 8.0 y 8.5, encontrándose dentro del rango recomendado. Este comportamiento demuestra que la incorporación de los aditivos utilizados permitió modificar y estabilizar el carácter químico del fluido, alcanzando condiciones más apropiadas para su utilización durante la perforación diamantina y garantizando la efectividad de los polímeros y demás componentes de la formulación.

Tabla 8. Comparación del pH del lodo

Tipo de lodo	Rango recomendado	pH obtenido	Cumplimiento
Convencional	8.0 – 9.5	5.0 – 6.0	No cumple
Formulación mejorada	8.0 – 9.5	8.0 – 8.5	Cumple

Nota: Juárez Ramos (2026).

La viscosidad Marsh constituye un parámetro utilizado para evaluar de manera rápida el comportamiento de flujo del lodo y su capacidad de circulación durante la perforación, siendo una de las mediciones más frecuentes en el trabajo de campo por su simplicidad y utilidad práctica. Para el pozo AKD-22, los resultados obtenidos muestran una diferencia entre el lodo convencional y la formulación mejorada que refleja el impacto de los aditivos en el comportamiento reológico del fluido. El lodo convencional presentó una viscosidad Marsh de 59.7 s/qt, mientras que el lodo mejorado alcanzó un valor de 47.5 s/qt. La formulación mejorada presentó una reducción de 12.2 s/qt respecto al lodo convencional, equivalente aproximadamente a una disminución del 20.4%. Esta reducción indica que el lodo mejorado presenta una menor resistencia al flujo, favoreciendo su circulación dentro del sondaje y reduciendo la posibilidad de generar condiciones de flujo excesivamente viscosas que podrían incrementar las presiones de bombeo y dificultar la limpieza del pozo.

Tabla 9. Viscosidad de Marsh – Pozo AKD-22

FORMULACIÓN DEL LODO		VISCOSIDAD MARSH (S/QT)
● Lodo convencional	Base	59.7
● Lodo mejorado	Optimizado	47.5

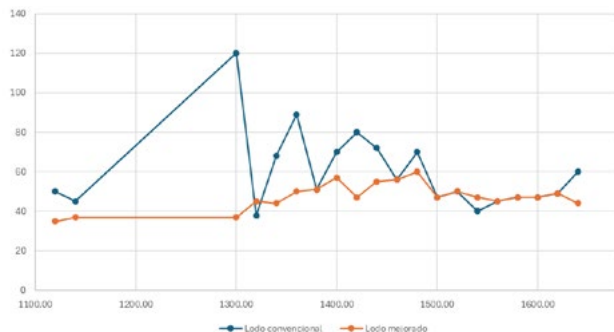
Nota: elaboración propia

Tabla 10. Variación de la viscosidad Marsh con la profundidad – Pozo AKD-22

PROFUNDIDAD (M)	TERRENO	VE CONVENCIONAL	VE MEJORADA
1120.00	● Roca compacta	50	35
1140.00	● Roca compacta	45	37
1300.00	● Roca compacta	120	37
1320.00	● Arena	38	45
1340.00	● Arena	68	44
1360.00	● Roca fracturada	89	50
1380.00	● Roca fracturada	51	51
1400.00	● Roca fracturada	70	57
1420.00	● Arena	80	47
1440.00	● Roca fracturada	72	55
1460.00	● Mineral	56	56
1480.00	● Roca fracturada	70	60
1500.00	● Roca fracturada	47	47
1520.00	● Roca fracturada	50	50
1540.00	● Roca fracturada	40	47
1560.00	● Roca compacta	45	45
1580.00	● Roca compacta	47	47
1600.00	● Roca compacta	47	47
1620.00	● Roca compacta	49	49
1640.00	● Roca compacta	60	44
Promedia general		59.0	47.1

Nota: elaboración propia

Figura 12. Variación de la viscosidad Marsh con la profundidad – Pozo AKD-22



Nota: Juárez Ramos (2026).

Para el pozo LF230-05, los resultados de viscosidad Marsh muestran un comportamiento muy similar entre el lodo convencional y la formulación mejorada, lo que indica que en este caso particular las condiciones del terreno y la preparación del fluido no generaron diferencias significativas en este parámetro. El lodo convencional presentó una viscosidad de 45.5 s/qt, mientras que el lodo mejorado alcanzó un valor de 45.05 s/qt. La formulación mejorada presentó una reducción de 0.45 s/qt respecto al lodo convencional, equivalente aproximadamente a una disminución del 0.99%. La diferencia observada es reducida, lo que indica que ambas formulaciones presentan características de flujo similares bajo las condiciones evaluadas. A pesar de la pequeña variación, el resultado obtenido con la formulación mejorada evidencia que la incorporación de los aditivos no produjo un incremento significativo de

la viscosidad Marsh, lo que resulta favorable porque permite mantener una viscosidad controlada sin generar un aumento innecesario de la resistencia al flujo.

Tabla 11. Viscosidad de Marsh promedio – Pozo Lf230-05

FORMULACIÓN DEL LODO		VISCOSIDAD MARSH (S/QT)
Lodo convencional	Base	45.5
Lodo mejorado	Optimizado	45.05

Nota: elaboración propia

Tabla 12. Variación de la viscosidad Marsh con la profundidad – LF230-05

PROFUNDIDAD (M)	TERRENO	VE CONVENCIONAL	VE MEJORADA
380.00	Roca compacta	52	40
400.00	Roca compacta	48	40
520.00	Roca compacta	47	47
540.00	Roca compacta	44	44
560.00	Roca compacta	32	32
580.00	Roca compacta	44	44
600.00	Roca compacta	59	45
620.00	Roca compacta	53	44
640.00	Roca compacta	45	45
660.00	Roca compacta	41	41
740.00	Roca compacta	53.6	34
760.00	Roca compacta	61.5	41.5
780.00	Roca compacta	39	39
800.00	Roca fracturada	41	47
820.00	Roca fracturada	42	50
840.00	Roca compacta	39	39
880.00	Roca compacta	38	38
920.00	Roca compacta	39	30
940.00	Roca compacta	31	31
960.00	Roca compacta	56	56
980.00	Roca compacta	60	60
1000.00	Roca compacta	36	36
1020.00	Roca compacta	55	55
1040.00	Roca compacta	50	50
1060.00	Roca compacta	46	46
1100.00	Mineral	60	60
1120.00	Mineral	57	57
1140.00	Mineral	52	55
1180.00	Mineral	36	60
Promedio general		45.4	44.3

Nota: elaboración propia

Figura 13. Variación de la viscosidad Marsh con la profundidad – Pozo LF230-05



Nota: Juárez Ramos (2026).

La caracterización reológica de los lodos en los pozos evaluados

Los resultados obtenidos para el pozo AKD-22 muestran una modificación favorable en las propiedades reológicas del lodo mediante la aplicación de la formulación mejorada, evidenciando el impacto positivo de los aditivos incorporados en el comportamiento del fluido. La viscosidad plástica (VP) presentó un incremento de 12.45 a 14.15 cP, mientras que el punto cedente (YP) aumentó de 5.90 a 16.85 lb/100 ft² respecto al lodo convencional. En el caso de la viscosidad plástica, se observa un incremento de 1.70 cP, equivalente aproximadamente al 13.65%. Esta variación representa un aumento moderado de la resistencia al flujo asociada principalmente a la interacción entre el fluido y los sólidos presentes en el sistema. El cambio más significativo se presentó en el punto cedente

(YP), el cual aumentó de 5.90 a 16.85 lb/100 ft², representando un incremento de 10.95 lb/100 ft², equivalente aproximadamente al 185.59%. Este resultado evidencia una mejora considerable en la capacidad del lodo para desarrollar esfuerzo de gel y mantener en suspensión los sólidos presentes en el fluido, lo que se traduce en una mejor limpieza del pozo y una reducción de los problemas de sedimentación.

Tabla 13. VP y YP promedio – Pozo AKD-22

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Viscosidad plástica, VP (cP)	12.45	14.15
Punto cedente, YP (lb/100 ft ²)	5.9	16.85

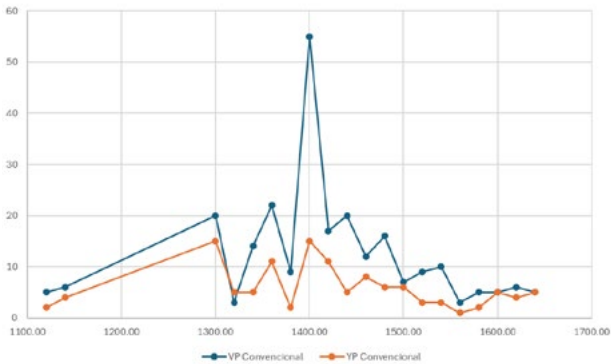
Nota: Juárez Ramos (2026).

Tabla 14. Variación de VP y YP con la profundidad – Pozo AKD-22

PROFUNDIDAD (M)	CONVENCIONAL		MEJORADA	
	VP (CP)	YP (LB/100 FT ³)	VP (CP)	YP (LB/100 FT ³)
1120.00	5	2	4	5
1140.00	6	4	5	7
1300.00	20	15	10	15
1320.00	3	5	10	13
1340.00	14	5	7	15
1360.00	23	11	20	23
1380.00	9	2	17	20
1400.00	55	15	21	23
1420.00	17	11	12	14
1440.00	20	5	19	20
1460.00	12	8	12	15
1480.00	16	6	16	18
1500.00	7	6	19	21
1520.00	9	3	15	16
1540.00	10	3	10	13
1560.00	3	1	18	21
1580.00	5	2	22	24
1600.00	5	5	17	19
1620.00	6	4	14	17
1640.00	5	5	15	18
Promedio general	13.6	6.1	13.9	16.5

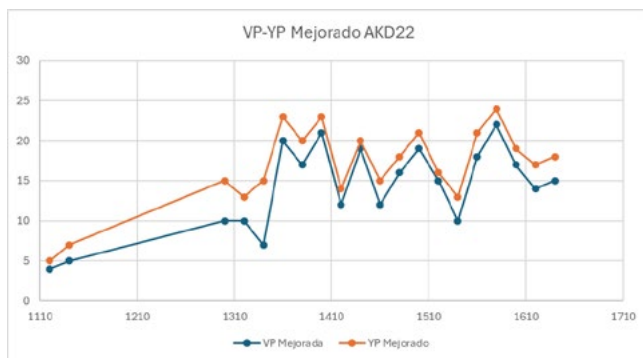
Nota: elaboración propia

Figura 14. Variación de VP y YP con la profundidad del lodo convencional – Pozo AKD-22



Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 15. Variación de VP y YP con la profundidad del lodo mejorado
— Pozo AKD-



Nota: Juárez Ramos (2026).

Para el pozo LF230-05, los resultados obtenidos muestran una modificación favorable de las propiedades reológicas del lodo mediante la aplicación de la formulación mejorada, siguiendo la misma tendencia observada en el pozo AKD-22. La viscosidad plástica (VP) disminuyó de 5.37 a 4.72 cP, mientras que el punto cedente (YP) aumentó considerablemente de 1.06 a 7.13 lb/100 ft² en comparación con el lodo convencional. La reducción de la viscosidad plástica fue de 0.65 cP, equivalente aproximadamente a un 12.10%, lo que indica una menor resistencia al flujo asociada a la presencia e interacción de los sólidos en el sistema. Por otro lado, el punto cedente presentó el cambio más significativo, pasando de 1.06 a 7.13 lb/100 ft², lo que representa un incremento de 6.07 lb/100 ft², equivalente aproximadamente al 572.64% respecto al lodo convencional. El comportamiento conjunto

de ambos parámetros resulta particularmente favorable, porque la formulación mejorada logró incrementar significativamente el YP mientras redujo la VP, obteniendo una mejora en la capacidad de suspensión y transporte de sólidos sin generar un aumento de la viscosidad plástica que pudiera dificultar la circulación del fluido.

Tabla 15. Variación de VP y YP con la profundidad – Pozo LF230-05

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Viscosidad plástica, VP (cP)	5.37	4.72
Punto cedente, YP (lb/100 ft ²)	1.06	7.13

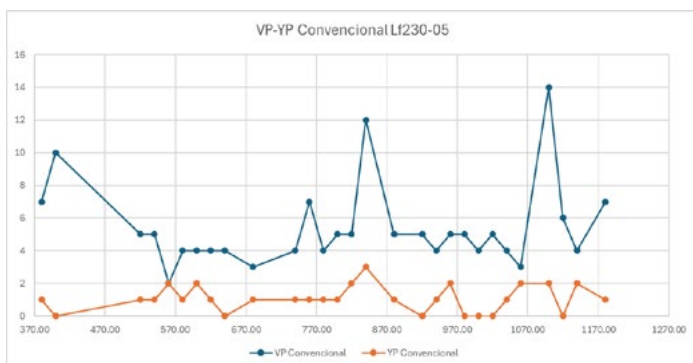
Nota: Juárez Ramos (2026).

Tabla 16. VP y YP – Lodo Convencional vs Lodo Mejorado

PROFUNDIDAD (M)	CONVENCIONAL		MEJORADA	
	VP (C/P)	YP (LB/100 P ^{1/2})	VP (C/P)	YP (LB/100 P ^{1/2})
380.00	7	1	5	7
400.00	10	0	7	9
520.00	5	1	3	6
540.00	5	1	1	5
560.00	2	2	2	6
580.00	4	1	3	5
600.00	4	2	2	4
620.00	4	1	4	6
640.00	4	0	1	5
680.00	3	1	2	4
740.00	4	1	2	5
760.00	7	1	4	7
780.00	4	1	5	6
800.00	5	1	5	8
820.00	5	2	10	12
840.00	12	3	4	8
880.00	5	1	3	5
920.00	5	0	5	6
940.00	4	1	4	7
960.00	5	2	2	5
980.00	5	0	2	5
1000.00	4	0	4	6
1020.00	5	0	5	7
1040.00	4	1	1	4
1060.00	3	2	2	3
1100.00	14	2	14	16
1120.00	6	0	10	12
1140.00	4	2	14	15
1180.00	7	1	9	13
Promedio general	5.3	1.0	4.8	7.5

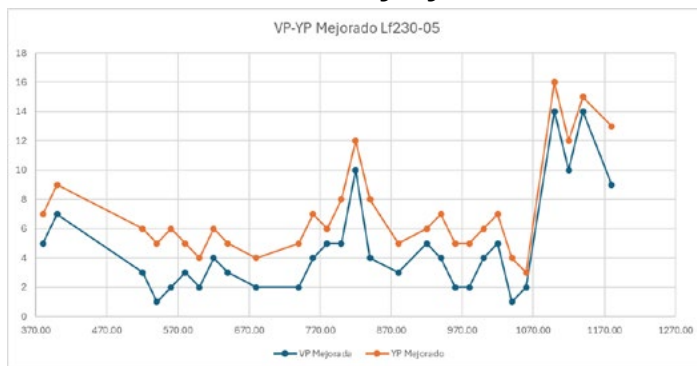
Nota: elaboración propia

Figura 16. Variación del VP y YP del lodo convencional con la profundidad – Pozo LF230-05



Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 17. Variación del VP y YP del lodo mejorado con la profundidad – Pozo LF230-05



Nota: Juárez Ramos (2026).

La resistencia de gel es un parámetro que permite evaluar la capacidad del fluido para desarrollar estructura durante los periodos de reposo y mantener los recortes en suspensión, siendo fundamental para garantizar la estabilidad

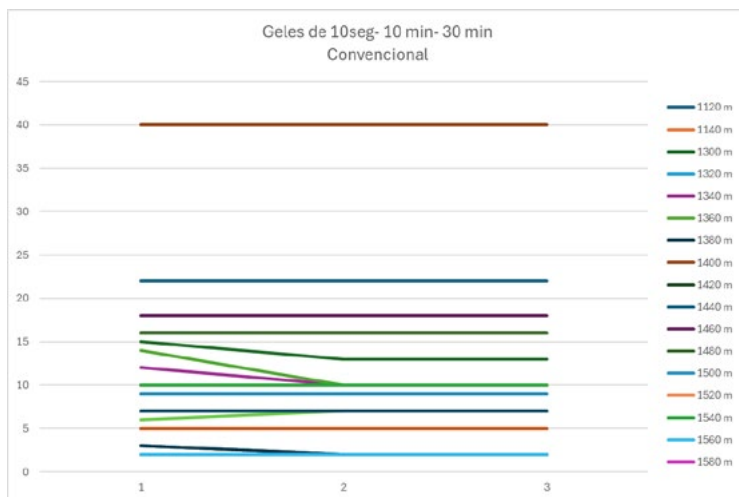
del pozo durante las interrupciones de la circulación. Para el pozo AKD-22, el lodo convencional presentó valores de 10.6 lb/100 ft² a los 10 segundos, 10.1 lb/100 ft² a los 10 minutos y 10.1 lb/100 ft² a los 30 minutos. La escasa variación entre las tres mediciones indica que el sistema desarrolló rápidamente su estructura de gel y posteriormente mantuvo un comportamiento prácticamente constante. Esta característica corresponde a un comportamiento de gel relativamente plano, lo cual favorece la estabilidad del fluido durante los periodos estáticos. Por otro lado, la formulación mejorada presentó valores de 10.8, 12.35 y 12.35 lb/100 ft² para los tiempos de 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos, respectivamente. Se observa un incremento inicial de 1.55 lb/100 ft² entre los 10 segundos y los 10 minutos, equivalente aproximadamente a un 14.35%, manteniéndose posteriormente constante hasta los 30 minutos. Este comportamiento evidencia que la estructura del gel se desarrolla durante los primeros minutos de reposo y posteriormente alcanza una condición estable, sin continuar incrementándose de manera significativa.

Tabla 17. Resistencia de gel promedio – Pozo AKD-22

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Gel 10 s (lb/100 ft ²)	10.6	10.8
Gel 10 min (lb/100 ft ²)	10.1	12.35
Gel 30 min (lb/100 ft ²)	10.1	12.35

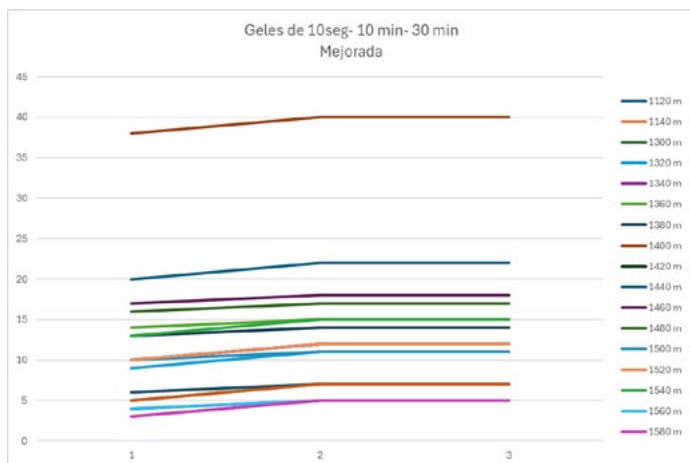
Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 18. Resistencia de gel del lodo convencional a diferente profundidad



Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 19. Resistencia de gel del lodo mejorado a diferentes profundidades



Nota: Juárez Ramos (2026).

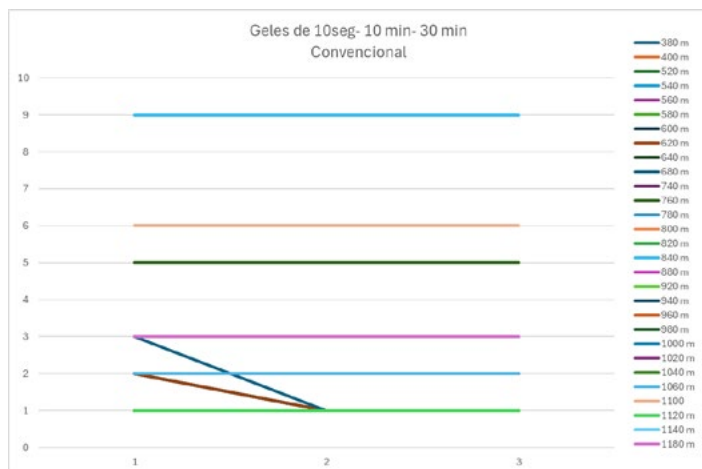
Para el pozo LF230-05, el lodo convencional presentó valores de 2.48, 2.27 y 2.27 lb/100 ft² a los 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos, respectivamente. La mínima variación entre las mediciones de 10 y 30 minutos indica que el sistema alcanzó rápidamente una estructura de gel y posteriormente permaneció estable. Sin embargo, los valores obtenidos son relativamente bajos, lo que puede limitar la capacidad del fluido para mantener los recortes en suspensión durante periodos prolongados sin circulación. En contraste, la formulación mejorada presentó valores de 4.65, 5.65 y 5.65 lb/100 ft² para los mismos tiempos de medición. El gel inicial aumentó de 2.48 a 4.65 lb/100 ft², representando un incremento del 87.50%, mientras que el gel de 10 minutos aumentó de 2.27 a 5.65 lb/100 ft², equivalente a un incremento del 148.90% respecto al lodo convencional. Este comportamiento evidencia una mayor capacidad de la formulación mejorada para desarrollar una estructura durante el periodo de reposo, lo que se traduce en una mejor suspensión de los recortes y una mayor estabilidad del pozo durante las interrupciones de la circulación.

Tabla 19. Resistencia de gel promedio – Pozo LF230-05

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Gel 10 s (lb/100 ft ²)	2.48	4.65
Gel 10 min (lb/100 ft ²)	2.27	5.65
Gel 30 min (lb/100 ft ²)	2.27	5.65

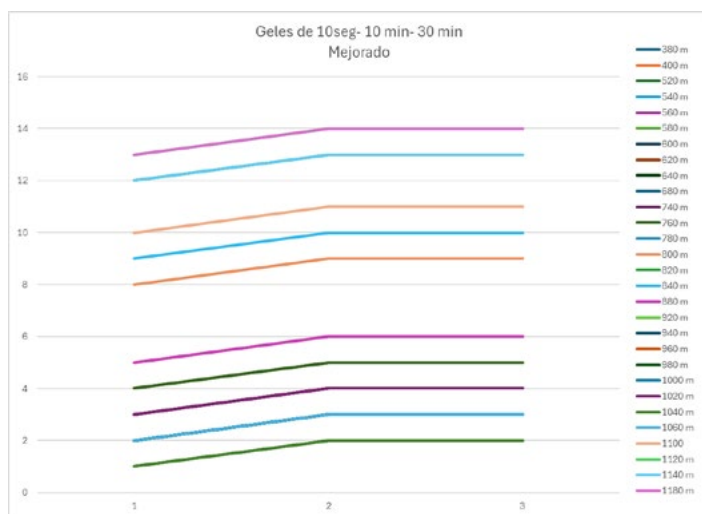
Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 20. Evolución de la resistencia de gel del lodo convencional a diferentes profundidades y tiempos de reposo



Nota: Juárez Ramos (2026).

Figura 21. Evolución de la resistencia de gel del lodo mejorado a diferentes profundidades y tiempos de reposo



Nota: Juárez Ramos (2026).

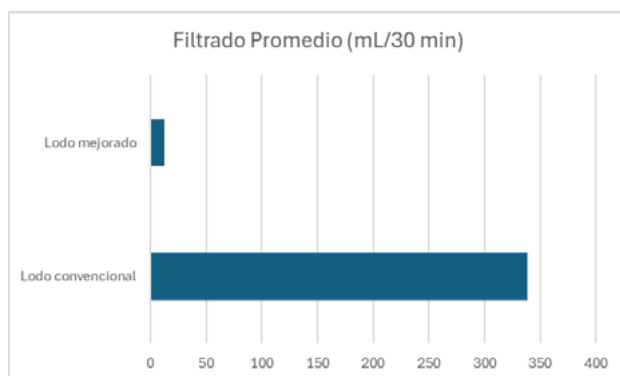
El filtrado API es un parámetro utilizado para evaluar el comportamiento de filtración estática del fluido de perforación, determinando el volumen de fase líquida que atraviesa un medio filtrante durante un periodo de 30 minutos bajo condiciones establecidas. En el pozo AKD-22, el lodo convencional presentó un filtrado promedio de 348.27 mL/30 min, mientras que el lodo mejorado registró un valor de 10.68 mL/30 min, evidenciándose una reducción de 337.59 mL/30 min, equivalente a una disminución del 96.93% respecto al sistema convencional. Este resultado representa una mejora considerable en el control de la pérdida de fase líquida del fluido, lo que se traduce en una menor invasión de la formación y una mayor estabilidad del pozo. La reducción del filtrado resulta particularmente relevante en la perforación diamantina, porque un adecuado control de la filtración contribuye a limitar la interacción excesiva del fluido con las paredes del sondaje y favorece la conservación de las condiciones de estabilidad del pozo, además de reducir el riesgo de daño a la formación.

Tabla 20. Filtrado promedio – Pozo AKD-22

TIPO DE LODO		FILTRADO PROMEDIO (ML/30 MIN)
Lodo convencional	Base	348.27
Lodo mejorado	Optimizado	10.68

Nota: elaboración propia

Figura 22. Comparación del volumen filtrado API promedio – AKD-22



Nota: Juárez Ramos (2026).

En el pozo LF230-05, los resultados del ensayo de filtrado API evidenciaron una diferencia considerable entre el lodo convencional y la formulación mejorada, confirmando la tendencia observada en el pozo AKD-22. El lodo convencional presentó un filtrado promedio de 348.27 mL/30 min, mientras que el lodo mejorado registró un valor de 10.68 mL/30 min. Esta diferencia representa una reducción de 337.59 mL/30 min, equivalente a una disminución del 96.93% respecto al lodo convencional. El elevado volumen de filtrado obtenido con el lodo convencional evidencia una menor capacidad de control de la fase líquida durante el ensayo, lo que se traduce en una mayor pérdida de fluido hacia la formación y en la formación de revoques gruesos e inestables. En contraste, el valor considerablemente menor obtenido con la formulación mejo-

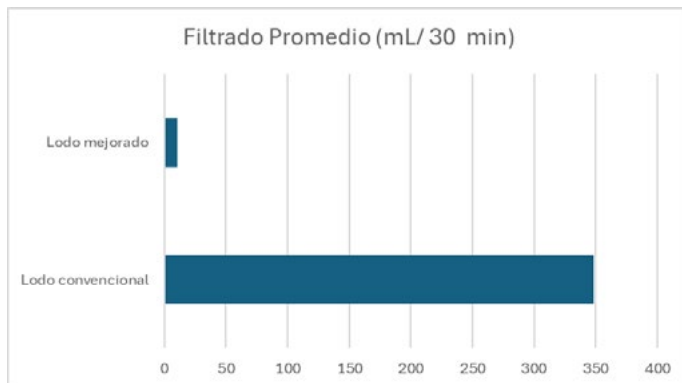
rada indica un mejor control de la filtración, lo cual puede relacionarse con la acción de los aditivos incorporados en el sistema, favoreciendo la formación de un revoque más eficiente y con menor permeabilidad.

Tabla 21. Filtrado promedio – Pozo LF230-05

TIPO DE LODO		FILTRADO PROMEDIO (ML/30 MIN)
Lodo convencional	Base	348.27
Lodo mejorado	Optimizado	10.68

Nota: elaboración propia

Figura 23. Comparación del volumen filtrado API promedio – LF230-05



Nota: Juárez Ramos (2026).

La formulación final se ajustó según el tipo de formación (compacta, fracturada o mineralizada), incorporando bentonita en dosificación variable, PAC LV/HV, polímero

viscosificante, goma xántica, controlador de pH y lubricantes según dureza de roca. Este diseño permitió obtener un fluido estable, con revoque delgado y adecuado transporte de recortes, adaptándose a las condiciones específicas de cada tipo de terreno y garantizando un desempeño óptimo en todas las fases de la perforación.

Tabla 22. Dosificación típica de aditivos en el lodo convencional

Aditivo	Función	Dosificación típica
Agua sin tratamiento	Fase continua	5.28 m ³
Bentonita común	Viscosificación	11.34–34.02 kg/m ³
Polímero genérico	Control limitado de recortes	0.5 – 1 kg/m ³
PAC	Control empírico de filtrado	1 – 2 kg/m ³
Ajuste de pH	—	No aplicado
Torqueles	Controlador de torque	No aplicado

Nota: Juárez Ramos (2026).

Para terreno de roca compacta, la comparación de formulaciones muestra que el lodo mejorado utiliza bentonita en dosificación controlada, polímero viscosificante calculado, PAC como reductor de filtrado, goma xántica y control de pH, logrando un flujo estable y controlado, mayor limpieza y mejor suspensión de recortes en comparación con el lodo convencional que presentaba un transporte irregular de recortes.

Tabla 23. Dosificación de aditivos en el lodo de formulación mejorada

Aditivo	Función	Dosificación típica
Agua tratada	Fase continua	5.28 m ³
Bentonita	Viscosificación controlada	5.67-22.68 kg/m ³
PAC LV / HV	Control de filtrado	1 - 2 kg/m ³
Polímero viscosificante	Transporte de recortes	1 kg/m ³
Controlador de pH (NaOH)	Activación de aditivos	1-2 kg/m ³
Goma Xántica	Suspende sólidos	1 - 1.5 kg/m ³
Torqueles	Controlador de toque	3- 5 L/ m ³

Nota: Juárez Ramos (2026).

Para terreno fracturado, muy fracturado y con tramos de roca molida, la formulación mejorada reduce la bentonita a dosificaciones calculadas, mantiene el polímero viscosificante, incrementa el PAC como reductor de filtrado, incorpora goma xántica y control de pH, logrando geles planos y mejor suspensión, en contraste con las pérdidas parciales e inestabilidad del lodo convencional.

Tabla 24. Comparación de formulaciones para roca compacta

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Bentonita	0 - 5 KG	0KG
Polímero viscosificante	0.5 kg (empírico)	1.0 - 1.5 kg (calculado)
PAC / Reductor de filtrado	0 - 0.5 KG	0 kg
Goma xántica	0KG	1-2.5 KG
Control de pH	0KG	1 kg (calculado)
Comportamiento	Transporte irregular de	Flujo estable y controlado, mayor limpieza y

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
observado	recortes	mejor suspensión de recortes.

Nota: Juárez Ramos (2026).

Para terreno fracturado con presencia de arena y mineral, la formulación mejorada ajusta la bentonita a dosificaciones calculadas, elimina el polímero viscosificante, mantiene el PAC como reductor de filtrado, incrementa la goma xántica y mantiene el control de pH, logrando geles planos, mejor suspensión, mejor formación de pared de pozo, limpieza y suspensión, superando las limitaciones del lodo convencional.

Tabla 25. Comparación de formulaciones para terreno fracturado

PARÁMETRO	LODO CONVENCIONAL	LODO MEJORADO
● Bentonita	11.34 – 34.02 kg Empírico	5.67 – 11.34 kg Calculado
● Polímero viscosificante	0.5 – 1 kg	0.5 kg
● PAC / Reductor de filtrado	1 – 2 kg	1 – 3 kg
● Goma xántica	0 – 0.5 kg	1 kg
● Control de pH	0 kg	1 kg
● Comportamiento observado	Pérdidas parciales Geles inestables	Geles planos Mejor desempeño

Nota: elaboración propia

Tabla 26. Comparación de formulaciones para terreno fracturado con presencia de arena y mineral

PARÁMETRO	LODO CONVENCIONAL	LODO MEJORADO
Bentonita	34.02 kg <i>Empírica</i>	11.34 – 22.68 kg <i>Calculado</i>
Polímero viscosificante	0.5 – 1 kg	0 kg
PAC / Reductor de filtrado	1 – 2 kg	2 kg
Goma xántica	0 – 0.5 kg	1 – 2 kg
Control de pH	0 kg	1 kg
Comportamiento observado	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas parciales • Gases inestables 	<ul style="list-style-type: none"> • Gases planos y mejor suspensión • Mejor formación de pared de pozo • Mejor limpieza y suspensión

Nota: elaboración propia

La evaluación del desempeño operacional y la discusión de los resultados

La evaluación del desempeño en campo permitió comparar directamente el comportamiento del lodo convencional frente a la formulación mejorada, considerando parámetros operacionales relacionados con la eficiencia de perforación, el comportamiento mecánico del sistema y la estabilidad del sondaje. En relación con el torque promedio, el lodo convencional presentó valores entre 3500 y 4000, mientras que con el lodo mejorado se registraron valores entre 2500 y 3000. Considerando los valores medios de ambos rangos, el torque disminuyó aproximadamente de 3750 a 2750, representando una reducción cercana al 26.7%. Esta disminución indica una menor resistencia al avance y al movimiento de la sarta durante la perforación, lo que puede favorecer un funcionamiento

más eficiente del sistema y reducir las condiciones de esfuerzo mecánico sobre los componentes de perforación.

Respecto a la velocidad de penetración (ROP), el lodo convencional alcanzó aproximadamente 400 m/turno, mientras que la formulación mejorada permitió obtener valores entre 500 y 600 m/turno. Considerando el valor medio del rango mejorado (550 m/turno), se observa un incremento aproximado del 37.5% respecto al sistema convencional. Este comportamiento evidencia una mejora en la productividad del proceso, permitiendo avanzar una mayor longitud de perforación durante una misma jornada de trabajo. La vida útil de la broca presentó una de las diferencias más significativas. Con el lodo convencional se obtuvo una vida útil aproximada de 50 m, mientras que con la formulación mejorada se alcanzaron 214 m, lo que representa un incremento de 164 m, equivalente a aproximadamente 328%. En términos comparativos, la broca utilizada con la formulación mejorada alcanzó una vida útil de aproximadamente 4.28 veces la registrada con el sistema convencional.

En cuanto a las pérdidas de circulación, el lodo convencional presentó una incidencia del 90%, mientras que con el lodo mejorado esta se redujo al 50%. Esto representa una disminución de 40 puntos porcentuales, equivalente a una reducción relativa aproximada del 44.4%. La reducción de este problema evidencia un mejor comportamien-

to del fluido frente a las condiciones de pérdida de circulación presentes durante la perforación, contribuyendo a mantener una circulación más eficiente y a disminuir la pérdida de fluido hacia la formación. Por otro lado, los eventos de atrapamiento constituyeron otro indicador importante del desempeño operacional. Durante la utilización del lodo convencional se registraron 2 eventos, mientras que con la formulación mejorada no se registraron atrapamientos, lo que representa una mejora significativa en términos de seguridad operacional y reducción de tiempos improductivos.

Tabla 27. Evaluación del desempeño

Parámetro	Lodo convencional	Lodo mejorado
Torque promedio	3500-4000	2500 - 3000
ROP (m/turno)	400	500 - 600
Vida útil de broca	50 m	214 m
Pérdidas de circulación	90 %	50 %
Atrapamientos	2 eventos	0 eventos

Nota: Juárez Ramos (2026).

El análisis de los resultados obtenidos demuestra una correlación directa entre la gestión técnica de las propiedades del fluido y el éxito operacional en la perforación diamantina de Antamina, evidenciando que la calidad del fluido es un factor determinante para la eficiencia del proceso. La investigación confirma que la calidad del agua base es el factor determinante para la activación de los

aditivos químicos, ya que los resultados iniciales mostraron que un pH ácido (5.0 – 6.0) y una dureza elevada (300 – 380 mg/L) inhibían la hidratación de la bentonita y provocaban la floculación de los polímeros en el sistema convencional. Al acondicionar el agua con NaOH para estabilizar el pH entre 8.0 y 8.5, se permitió una expansión eficiente de las láminas de bentonita, lo que no solo optimizó el consumo de aditivos sino que garantizó la estabilidad coloidal del sistema, algo que el lodo convencional, preparado en forma empírica y sin tratamiento de agua, no podía lograr.

Un hallazgo clave en la discusión es la relación YP/VP, que constituye un indicador fundamental de la capacidad del fluido para transportar recortes y mantener la estabilidad del pozo. En los lodos convencionales, se observó una relación deficiente que impedía la suspensión de sólidos, provocando que los recortes decantaran y aumentaran el torque operativo. La formulación mejorada priorizó el incremento del Punto Cedente (YP), alcanzando promedios de 16.85 lb/100 ft² en el pozo AKD-22, sin elevar drásticamente la viscosidad plástica. Técnicamente, este equilibrio es fundamental porque un YP elevado mejora la limpieza del pozo, mientras que una VP controlada evita el aumento innecesario de las presiones de circulación. El uso de Goma Xántica fue vital para desarrollar esta estructura reológica estable y geles de tendencia progresiva,

asegurando que los recortes permanezcan suspendidos incluso durante paradas operativas.

La reducción drástica del filtrado API (de 348.27 ml a 10.68 ml) representa quizás el mayor avance técnico de la nueva formulación, ya que el elevado filtrado del lodo convencional causaba una invasión excesiva hacia la formación, generando revoques gruesos e inestables que derivaban en atrapamientos diferenciales y daño a la formación. El uso de PAC (Polianión Celulósico) permitió la formación de un revoque delgado y poco permeable que protege las paredes del pozo en zonas altamente fracturadas y mineralizadas de Antamina, minimizando la interacción entre el fluido y la roca, lo que reduce significativamente el riesgo de derrumbes y pérdidas de circulación severas. La discusión final se basa en la validación de la premisa de investigación a través de indicadores económicos y técnicos, demostrando que la reducción del torque, el aumento de la ROP, el incremento en la vida útil de la broca, la reducción de pérdidas de circulación y la eliminación de eventos de atrapamiento confirman que la gestión técnica de fluidos minimiza los tiempos improductivos y los costos adicionales asociados a la recuperación de herramientas.

Capítulo 5

La transferencia tecnológica como eje de transformación. Una relectura de la optimización de fluidos de perforación desde la teoría de la innovación en industrias maduras

Las condiciones de posibilidad de la transferencia tecnológica entre industrias

La transferencia de tecnologías desde la industria petrolera hacia la minería diamantina no constituye un fenómeno espontáneo ni automático, sino el resultado de una serie de condiciones que hicieron posible que los aditivos y técnicas desarrollados en un sector fueran adaptados y validados en otro. La primera de estas condiciones es la existencia de una asimetría tecnológica entre ambas industrias, que se manifiesta en el grado de desarrollo alcanzado por la industria petrolera en el manejo de fluidos de perforación, donde décadas de investigación y experiencia operativa han permitido acumular un conocimiento sofisticado sobre reología, control de filtrado y estabilidad de pozos en condiciones extremas. Esta asimetría, lejos de ser un obstáculo, constituye la condición de posibilidad de la transferencia, porque identifica un acervo de conocimiento y tecnología que puede ser aprovechado por la industria minera para superar las limitaciones de sus prácticas convencionales. La literatura sobre innovación en industrias maduras ha señalado que los sectores que han desarrollado capacidades tecnológicas avanzadas en un dominio específico pueden convertirse en fuentes de innovación para otros sectores que enfrentan problemas análogos, siempre que existan los mecanismos de traducción y adaptación necesarios.

La segunda condición es la existencia de problemas análogos en ambas industrias, que permiten que las soluciones desarrolladas en una sean potencialmente aplicables en la otra. En el caso de los fluidos de perforación, tanto la industria petrolera como la minería diamantina enfrentan desafíos relacionados con el transporte de recortes, la estabilidad del pozo, la lubricación de la broca y el control de la filtración. Aunque las escalas y las condiciones específicas difieren, la naturaleza de los problemas es suficientemente similar como para que las soluciones desarrolladas en un contexto puedan ser adaptadas al otro. Esta analogía problemática constituye el fundamento técnico de la transferencia y explica por qué los aditivos utilizados en la industria petrolera, como el PAC, la goma xántica y los controladores de pH, pudieron ser incorporados en la formulación de lodos para perforación diamantina sin requerir un rediseño completo de los sistemas. La literatura sobre transferencia tecnológica ha identificado que la existencia de problemas análogos es una de las condiciones más importantes para el éxito de la adaptación de tecnologías entre sectores, porque reduce la incertidumbre técnica y permite aprovechar el conocimiento acumulado en la industria fuente.

La tercera condición es la existencia de mecanismos de validación que permitan verificar empíricamente la efectividad de las tecnologías transferidas en el contexto receptor. En el caso de esta investigación, la validación se

realizó mediante la comparación sistemática de las propiedades reológicas y de filtración del lodo convencional y el lodo mejorado en dos pozos representativos, así como mediante la evaluación de indicadores operacionales como el torque, la velocidad de penetración, la vida útil de la broca y la incidencia de pérdidas de circulación. Esta validación empírica no solo permitió demostrar la efectividad de las tecnologías transferidas, sino que también generó la evidencia necesaria para legitimar su adopción entre los actores involucrados en la operación. La literatura sobre transferencia tecnológica ha señalado que la validación empírica constituye un elemento crítico en los procesos de adaptación, porque permite reducir la incertidumbre asociada a la incorporación de tecnologías foráneas y construir confianza entre los usuarios finales. Sin evidencia concreta de que las tecnologías funcionan en el contexto receptor, la adopción tiende a ser resistida por los actores que desconfían de las soluciones importadas y que prefieren mantener las prácticas conocidas.

La cuarta condición es la existencia de capacidades técnicas locales que permitan adaptar y sostener las tecnologías transferidas. En el caso de esta investigación, la movilización de un laboratorio móvil y de técnicos especialistas en fluidos de perforación permitió realizar el diagnóstico de las propiedades del lodo en el sitio de operaciones, así como la formulación y validación de las mezclas optimizadas. Estas capacidades técnicas no existían previamente

en la organización y tuvieron que ser construidas mediante la incorporación de personal especializado y la implementación de procedimientos de medición estandarizados. La literatura sobre transferencia tecnológica ha señalado que la construcción de capacidades locales es uno de los factores más determinantes para la sostenibilidad de las tecnologías transferidas, porque sin capacidades propias la organización queda dependiendo de proveedores externos y pierde la posibilidad de adaptar y mejorar las soluciones a lo largo del tiempo. La experiencia de esta investigación demuestra que la transferencia tecnológica no es solo una operación de importación de productos, sino un proceso de construcción de capacidades que involucra la formación de personal, la implementación de procedimientos y la creación de infraestructura técnica.

La validación empírica como proceso de construcción de confianza

La validación empírica de las tecnologías transferidas constituye un proceso complejo que no se limita a la demostración técnica de la efectividad de los aditivos, sino que involucra la construcción de confianza entre los actores que deben adoptar las nuevas prácticas. En el caso de esta investigación, la validación se realizó mediante un riguroso programa de ensayos de laboratorio y mediciones de campo que permitieron comparar el desempeño del

lodo convencional y el lodo mejorado en condiciones operativas reales. Los resultados obtenidos en el pozo AKD-22 y el pozo LF230-05 evidenciaron mejoras consistentes en todos los parámetros evaluados, incluyendo el pH, la viscosidad Marsh, el punto cedente, la resistencia de gel y el filtrado API. Estas mejoras no solo demostraron la efectividad técnica de las tecnologías transferidas, sino que también proporcionaron la evidencia necesaria para convencer a los actores involucrados de que la adopción de las nuevas prácticas era una decisión fundamentada y no un simple acto de fe en las bondades de la tecnología foránea.

La construcción de confianza a través de la validación empírica es especialmente relevante en contextos donde las prácticas empíricas han estado arraigadas durante décadas y donde existe una desconfianza natural hacia las soluciones importadas. La literatura sobre transferencia tecnológica ha señalado que la resistencia a la adopción de tecnologías foráneas no es simplemente una cuestión de ignorancia o conservadurismo, sino una respuesta racional a la incertidumbre asociada a la incorporación de soluciones que no han sido probadas en el contexto local. En este sentido, la validación empírica cumple una función pedagógica y política: pedagógica porque permite a los actores comprender los mecanismos a través de los cuales las tecnologías transferidas generan mejoras, y po-

lítica porque les proporciona argumentos objetivos para justificar la adopción de las nuevas prácticas ante sus superiores y colegas. La experiencia de esta investigación demuestra que la validación empírica no solo reduce la incertidumbre técnica, sino que también fortalece la confianza de los actores en la toma de decisiones, creando condiciones más favorables para la adopción sostenida de las tecnologías transferidas.

La validación empírica también cumple una función de adaptación, porque permite identificar las modificaciones necesarias para que las tecnologías transferidas funcionen en el contexto receptor. En el caso de esta investigación, la formulación de lodos optimizada no fue una simple copia de las prácticas de la industria petrolera, sino el resultado de un proceso de adaptación en el que se ajustaron las concentraciones de aditivos, se modificaron los procedimientos de mezcla y se incorporaron controles específicos para las condiciones del agua base y la litología del terreno. Estas adaptaciones no habrían sido posibles sin un proceso de validación empírica que permitiera identificar las deficiencias de las formulaciones iniciales y ajustarlas progresivamente hasta alcanzar el desempeño deseado. La literatura sobre transferencia tecnológica ha señalado que la adaptación es un proceso iterativo que requiere ciclos de prueba, error y corrección, y que la validación empírica constituye el mecanismo a través del cual se identifican las modificaciones necesarias. La experiencia

de esta investigación confirma que la adaptación no es un proceso automático, sino el resultado de un trabajo sistemático de experimentación y ajuste que involucra tanto el conocimiento técnico como la experiencia operativa de los actores locales.

La validación empírica también contribuye a la construcción de conocimiento organizacional, porque genera datos y evidencias que pueden ser utilizados para fundamentar decisiones futuras y para mejorar las prácticas existentes. En el caso de esta investigación, los datos recogidos durante los ensayos de laboratorio y las mediciones de campo constituyen una base de conocimiento que puede ser utilizada para optimizar las formulaciones en función de las condiciones cambiantes del terreno, así como para establecer correlaciones entre las propiedades del lodo y el desempeño operacional que permitan anticipar problemas y tomar decisiones preventivas. La literatura sobre gestión del conocimiento ha señalado que la documentación sistemática de los resultados y su integración en los sistemas de información de la organización constituyen prácticas fundamentales para la sostenibilidad de las innovaciones, porque permiten que el conocimiento generado no se pierda con la rotación del personal y pueda ser aprovechado por las generaciones futuras de operadores. La experiencia de esta investigación demuestra que la validación empírica no solo genera confianza y adaptaciones, sino que también construye un acervo de conoci-

miento organizacional que constituye un activo intangible de gran valor para la sostenibilidad de las mejoras implementadas.

La transferencia tecnológica como construcción de capacidades organizacionales

La transferencia de tecnologías desde la industria petrolera hacia la minería diamantina no se agota en la incorporación de aditivos o en la validación empírica de su efectividad, sino que constituye un proceso de construcción de capacidades organizacionales que involucra la transformación de las prácticas, los protocolos y las culturas técnicas de la organización receptora. En el caso de esta investigación, la adopción de las tecnologías transferidas implicó la implementación de un laboratorio móvil para el diagnóstico de las propiedades del lodo, la movilización de técnicos especialistas en fluidos de perforación, la implementación de procedimientos de medición estandarizados y la transformación de las prácticas empíricas de preparación de lodos en protocolos técnicos basados en el control reológico. Estas transformaciones no solo permitieron la aplicación efectiva de las tecnologías transferidas, sino que también generaron capacidades organizacionales que permanecen en la organización más allá de la duración del proyecto y que constituyen un activo estratégico para el futuro.

La construcción de capacidades organizacionales a través de la transferencia tecnológica es un proceso complejo que involucra múltiples dimensiones, entre ellas la dimensión técnica, la dimensión organizacional y la dimensión cultural. La dimensión técnica se refiere a la adquisición de conocimientos y habilidades específicas relacionadas con las tecnologías transferidas, así como a la implementación de infraestructura y procedimientos que permitan su aplicación efectiva. La dimensión organizacional se refiere a la transformación de las estructuras, los procesos y las rutinas de la organización para integrar las nuevas prácticas en su funcionamiento cotidiano. La dimensión cultural se refiere a la transformación de los valores, las creencias y las actitudes de los actores involucrados, que deben pasar de una lógica empírica a una lógica técnica y de una cultura de la improvisación a una cultura de la planificación y el control. La literatura sobre capacidades organizacionales ha señalado que estas tres dimensiones son interdependientes y que el éxito de la transferencia tecnológica depende de la capacidad de la organización para transformarlas simultáneamente. La experiencia de esta investigación demuestra que la dimensión cultural es particularmente crítica, porque sin un cambio en las actitudes y las creencias de los actores, las transformaciones técnicas y organizacionales no se sostienen en el tiempo y tienden a revertirse a las prácticas anteriores.

La construcción de capacidades organizacionales también involucra la creación de mecanismos de aprendizaje que permitan a la organización adaptarse a los cambios del entorno y mejorar continuamente sus prácticas. En el caso de esta investigación, la implementación de un programa de monitoreo diario de las propiedades del lodo, la documentación sistemática de los resultados y la retroalimentación continua entre los técnicos especialistas y los operadores constituyen mecanismos de aprendizaje que permiten a la organización identificar problemas, probar soluciones y ajustar sus prácticas en función de los resultados obtenidos. La literatura sobre organizaciones que aprenden ha señalado que la capacidad de aprendizaje constituye uno de los factores más determinantes para la sostenibilidad de las innovaciones, porque permite a la organización adaptarse a los cambios del entorno y mejorar continuamente sus prácticas. La experiencia de esta investigación demuestra que el aprendizaje no es un proceso espontáneo, sino el resultado de la implementación deliberada de mecanismos que permiten la captura, el análisis y la difusión del conocimiento generado durante la operación.

La construcción de capacidades organizacionales también involucra la transformación de las relaciones de poder y las estructuras de incentivos que determinan el comportamiento de los actores. En el caso de esta investigación, la adopción de las tecnologías transferidas implicó la in-

corporación de técnicos especialistas en fluidos de perforación que asumieron un rol de liderazgo técnico en la preparación y validación de los lodos, desplazando parcialmente a los operadores que tradicionalmente habían controlado estas prácticas de manera empírica. Este desplazamiento no estuvo exento de tensiones y resistencias, porque implicó una redefinición de las responsabilidades y una pérdida de autonomía para algunos actores. La literatura sobre transferencia tecnológica ha señalado que las innovaciones que transforman las prácticas existentes tienden a generar resistencias entre los actores que ven amenazadas sus posiciones o sus rutinas, y que el éxito de la transferencia depende de la capacidad de la organización para gestionar estas resistencias y construir consensos en torno a las nuevas prácticas. La experiencia de esta investigación demuestra que la gestión del cambio constituye una dimensión crítica de la transferencia tecnológica, porque sin ella las transformaciones técnicas no se traducen en cambios sostenibles en las prácticas organizacionales.

Conclusiones parciales: hacia una comprensión integral de la transferencia tecnológica en la minería

La relectura de los hallazgos de esta investigación desde la perspectiva de la transferencia tecnológica per-

mite extraer conclusiones que enriquecen y resignifican las interpretaciones presentadas en los capítulos precedentes. En primer lugar, se ha establecido que la optimización de los fluidos de perforación diamantina en Antamina constituye un caso paradigmático de transferencia tecnológica entre industrias, en el que la existencia de una asimetría tecnológica entre la industria petrolera y la minería, la presencia de problemas análogos en ambas industrias, la existencia de mecanismos de validación empírica y la construcción de capacidades técnicas locales constituyen las condiciones de posibilidad que hicieron viable la adaptación de tecnologías foráneas al contexto receptor. La transferencia tecnológica no es, por lo tanto, un proceso automático ni espontáneo, sino el resultado de condiciones que deben ser construidas deliberadamente y que involucran tanto dimensiones técnicas como organizacionales y culturales.

En segundo lugar, se ha argumentado que la validación empírica constituye un elemento crítico en los procesos de transferencia tecnológica, porque permite demostrar la efectividad de las tecnologías transferidas, construir confianza entre los actores involucrados, identificar las adaptaciones necesarias y generar conocimiento organizacional que puede ser utilizado para fundamentar decisiones futuras. La validación empírica no es solo una operación técnica, sino un proceso de construcción de confianza y

legitimidad que involucra dimensiones pedagógicas y políticas, y que resulta especialmente relevante en contextos donde las prácticas empíricas han estado arraigadas durante décadas y donde existe una desconfianza natural hacia las soluciones importadas.

En tercer lugar, se ha planteado que la transferencia tecnológica constituye un proceso de construcción de capacidades organizacionales que involucra la transformación de las prácticas, los protocolos y las culturas técnicas de la organización receptora. Esta construcción de capacidades no se limita a la adquisición de conocimientos y habilidades técnicas, sino que involucra la transformación de las estructuras organizacionales, la creación de mecanismos de aprendizaje y la gestión de las resistencias y tensiones que inevitablemente surgen cuando se transforman las prácticas existentes. La sostenibilidad de las mejoras implementadas depende de la capacidad de la organización para construir y mantener estas capacidades a lo largo del tiempo, así como para adaptarlas a los cambios del entorno y mejorar continuamente sus prácticas.

Estas conclusiones conectan con el resto de la obra y enriquecen las interpretaciones presentadas en los capítulos precedentes al añadir una dimensión de análisis que había permanecido implícita en el estudio. La optimización de los fluidos de perforación diamantina no es solo un problema técnico de selección de aditivos y ajuste de for-

mulaciones, sino un proceso de transferencia tecnológica que involucra la construcción de capacidades organizacionales, la gestión del cambio y la transformación de las culturas técnicas. La obra que aquí concluye no pretende ofrecer una solución definitiva a este complejo problema, sino contribuir a la comprensión de sus dimensiones fundamentales y a la construcción de un marco interpretativo que permita diseñar estrategias más efectivas y sostenibles para la transferencia de tecnologías en la industria minera.

Capítulo 6

*Los aprendizajes consolidados y las rutas para la
optimización continua*

La síntesis de los hallazgos y su significado para la operación

El desarrollo de esta investigación ha permitido establecer una serie de hallazgos significativos que configuran un nuevo entendimiento sobre la gestión de fluidos de perforación en la minería diamantina y que sientan las bases para la optimización continua de esta práctica en la unidad minera Antamina. El primer hallazgo de relevancia sustantiva se refiere al impacto determinante de la calidad del agua base en el desempeño del fluido de perforación. Se ha establecido que el agua utilizada inicialmente en Antamina presentaba pH ácido, con valores que oscilaban entre 5.0 y 6.0, así como una dureza elevada que alcanzaba valores entre 300 y 380 mg/L. Estos factores inhibían la hidratación de la bentonita y la eficiencia de los polímeros, lo que provocaba una baja estabilidad coloidal y un filtrado excesivo que comprometía la integridad del pozo desde el inicio mismo de la operación. La caracterización fisicoquímica del agua base constituye, por lo tanto, un paso fundamental que debe preceder a cualquier formulación de lodo, ya que determina la efectividad de los aditivos y la viabilidad de la mezcla.

El segundo hallazgo se refiere a las deficiencias críticas del sistema convencional de preparación de lodos que se utilizaba en la unidad minera. El lodo convencional mos-

tró limitaciones severas en su capacidad de transporte, con una relación YP/VP insuficiente que favorecía la decantación de recortes y el aumento del torque operativo. Estas condiciones resultaron en eventos recurrentes de atrapamiento de tubería, rotura de wireline y un desgaste prematuro de las brocas, reduciendo la eficiencia global de la perforación y generando tiempos improductivos que afectaban directamente los costos operativos. La evidencia recogida durante el diagnóstico inicial confirmó que la preparación empírica del lodo, sin control técnico riguroso ni tratamiento previo del agua base, conduce a una alta variabilidad reológica que se traduce en problemas operacionales sistemáticos que se repiten campaña tras campaña sin que se establezcan mecanismos efectivos de corrección.

El tercer hallazgo se refiere a la efectividad de la formulación optimizada que incorpora aditivos y tecnologías provenientes de la industria petrolera. La implementación de una formulación técnica basada en aditivos como el PAC (Polianión Celulósico), la Goma Xántica y el NaOH logró estabilizar el pH entre 8.0 y 8.5 y reducir drásticamente el filtrado API de más de 330 mL a menos de 12.3 mL. Esto permitió la formación de un revoque delgado y resistente, esencial para la estabilidad del pozo en zonas fracturadas y mineralizadas, donde las condiciones geológicas representan un desafío significativo para la operación. La sinergia entre los aditivos incorporados, particularmente

el PAC como reductor de filtrado y la goma xántica como agente suspensor, constituye el fundamento técnico de la mejora observada y demuestra que la adaptación de tecnologías previamente validadas en condiciones operativas más exigentes es una vía efectiva para superar las limitaciones de los métodos convencionales.

El cuarto hallazgo se refiere a la mejora sustancial en el desempeño operacional que se derivó de la implementación de la formulación optimizada. Los resultados validan que el lodo mejorado optimiza significativamente los indicadores de productividad, lográndose una reducción del torque promedio de 3500 a 2500, un aumento en la velocidad de penetración (ROP) de 400 a 600 m/turno y una extensión de la vida útil de la broca de 50 m a 214 m. Además, se eliminaron por completo los eventos de atrapamiento durante las pruebas, lo que representa una mejora significativa en términos de seguridad operacional y reducción de tiempos improductivos. La reducción de las pérdidas de circulación del 90% al 50% constituye otro indicador elocuente del mejor comportamiento del fluido frente a las condiciones de pérdida de circulación presentes durante la perforación.

El quinto hallazgo se refiere a la validación de la premisa central que orientó esta investigación. Se confirma que la gestión técnica de los fluidos de perforación, ajustada a las condiciones fisicoquímicas del agua y a la litología

del terreno, constituye un factor determinante para minimizar riesgos operacionales, garantizar la estabilidad del pozo y reducir los costos por metro perforado en Antamina. La evidencia empírica recogida durante los ensayos de campo y laboratorio demuestra que la adaptación de técnicas de la industria petrolera permite superar las limitaciones de los métodos convencionales y establecer un nuevo estándar de desempeño para la perforación diamantina, sentando las bases para una gestión más eficiente y segura de las operaciones exploratorias.

Las orientaciones para la implementación y el mejoramiento continuo

La primera orientación que emerge de esta investigación se refiere a la necesidad de establecer un protocolo de control de calidad rutinario del agua base que incluya la medición de pH, dureza y cloruros antes de cada mezcla. La implementación de este protocolo asegura que los aditivos se activen correctamente y evita el desperdicio de insumos por floculación, garantizando que la inversión en productos químicos se traduzca en mejoras efectivas del desempeño del fluido. La caracterización del agua debe convertirse en una práctica estándar en todas las operaciones de perforación diamantina, porque la calidad del agua determina en gran medida la eficiencia de los aditivos y la estabilidad del lodo, y porque la experiencia ha

demostrado que la omisión de este paso conduce a resultados inconsistentes y a problemas operacionales recurrentes que podrían prevenirse con una inversión mínima en control de calidad.

La segunda orientación se refiere a la importancia de contar con la presencia permanente de un especialista en fluidos para supervisar la preparación y dosificación de los lodos durante las operaciones. Esta supervisión técnica especializada garantiza la transición de una mezcla empírica a un control reológico científico, evitando la variabilidad que se observaba en el sistema convencional y asegurando que las formulaciones se ajusten a las condiciones cambiantes del terreno. La presencia del especialista permite además identificar oportunamente las desviaciones en las propiedades del lodo y tomar acciones correctivas antes de que se produzcan problemas operacionales mayores, contribuyendo así a la continuidad de las operaciones y a la reducción de los tiempos improductivos que tanto afectan la productividad de las campañas exploratorias.

La tercera orientación se refiere al mantenimiento de un programa de monitoreo diario de parámetros como viscosidad plástica, punto cedente, geles y filtrado API, siguiendo estrictamente la norma API RP 13B-1. Este programa de monitoreo constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones operativas y permite detectar

oportunamente cualquier desviación en las propiedades del fluido, así como evaluar la efectividad de las formulaciones implementadas a lo largo del tiempo. La estandarización de los procedimientos de medición y el registro sistemático de los datos permiten construir una base de conocimiento que puede ser utilizada para optimizar futuras formulaciones y para establecer correlaciones entre las propiedades del lodo y el desempeño operacional en diferentes tipos de terreno y condiciones de perforación.

La cuarta orientación se refiere a la implementación de programas de entrenamiento para los auxiliares y perforadores sobre la manipulación segura de aditivos químicos, incluyendo el conocimiento de las hojas de datos de seguridad de materiales (MSDS), así como sobre las técnicas de mezclas estandarizadas que garanticen la reproducibilidad de las formulaciones. La capacitación del personal es un elemento clave para garantizar la correcta aplicación de la formulación mejorada y para prevenir accidentes asociados al manejo de productos químicos, reforzando así la seguridad y salud ocupacional en las operaciones de perforación diamantina. El conocimiento técnico del personal operativo constituye un activo intangible que contribuye significativamente al éxito de las operaciones y a la sostenibilidad de las mejoras implementadas.

La quinta orientación se refiere a la ampliación del programa de fluidos optimizado a todas las fases del proyec-

to en Antamina, adaptando las concentraciones de PAC y Goma Xántica según se atravesen zonas compactas, fracturadas o mineralizadas. La experiencia adquirida durante esta investigación demuestra que no existe una formulación única que sea óptima para todas las condiciones geológicas, sino que se requiere una adaptación sistemática de las dosificaciones en función del tipo de terreno que se está perforando. La implementación de un sistema de clasificación de terrenos y de formulaciones específicas para cada tipo de formación permitiría optimizar el desempeño del fluido en todas las fases del proyecto y garantizar la estabilidad del pozo independientemente de las condiciones geológicas que se encuentren.

La sexta orientación se refiere a la incorporación de indicadores económicos en tiempo real que vinculen el consumo de aditivos con los tiempos de detención y el avance de perforación, permitiendo optimizar la toma de decisiones financieras en futuras campañas. La digitalización de los procesos de monitoreo y la implementación de dashboards que integren información técnica y económica permitirían evaluar el retorno de la inversión en aditivos especializados y ajustar las formulaciones en función de los resultados operacionales y los costos asociados. La gestión basada en datos y la evaluación continua del desempeño constituyen prácticas recomendadas que contribuyen a la mejora continua y a la sostenibilidad de las operaciones de perforación diamantina en el largo plazo.

Las reflexiones finales sobre el significado de la investigación

La presente investigación representa una contribución significativa al conocimiento sobre la gestión de fluidos de perforación en la minería diamantina, estableciendo un puente entre las tecnologías desarrolladas en la industria petrolera y su aplicación en el contexto minero. La adaptación de aditivos como el PAC, la goma xántica y los controladores de pH, que han sido ampliamente validados en condiciones operativas más exigentes, demuestra que la transferencia tecnológica entre industrias constituye una vía efectiva para superar las limitaciones de los métodos convencionales y para establecer nuevos estándares de desempeño en sectores que tradicionalmente han dependido de prácticas empíricas. El valor de esta investigación radica no solo en los resultados concretos que se han obtenido, sino en el marco conceptual y metodológico que establece para abordar la optimización de los fluidos de perforación desde una perspectiva técnica y científica.

La investigación ha demostrado que la gestión de los fluidos de perforación no es un aspecto secundario de las operaciones mineras, sino un factor crítico que determina la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de las campañas exploratorias. La evidencia empírica recogida durante los ensayos de campo y laboratorio confirma que una

adecuada formulación del lodo, ajustada a las condiciones fisicoquímicas del agua y a la litología del terreno, puede reducir significativamente los problemas operacionales y mejorar los indicadores de productividad. Esta constatación invita a revalorizar la función de los fluidos de perforación en la minería y a asignarles la importancia que merecen en la planificación y ejecución de las operaciones exploratorias, reconociendo que la inversión en aditivos especializados y en supervisión técnica se traduce en beneficios tangibles que superan ampliamente los costos asociados.

La investigación también ha puesto de manifiesto la importancia de la caracterización del agua base como paso previo a cualquier formulación de lodo, así como la necesidad de establecer protocolos de control de calidad que garanticen la consistencia de las mezclas. La experiencia demuestra que la omisión de estos pasos conduce a resultados inconsistentes y a problemas operacionales recurrentes que podrían prevenirse con una inversión mínima en control de calidad. La estandarización de los procedimientos y la documentación sistemática de los resultados constituyen prácticas recomendadas que contribuyen a la construcción de conocimiento organizacional y a la mejora continua de los procesos.

Finalmente, la investigación ha validado la premisa central que la orientó, confirmando que la gestión técnica de

los fluidos de perforación constituye un factor determinante para minimizar riesgos operacionales, garantizar la estabilidad del pozo y reducir los costos por metro perforado. Los resultados obtenidos no solo respaldan esta premisa, sino que proporcionan evidencia cuantitativa sobre la magnitud de las mejoras que pueden lograrse mediante la implementación de formulaciones optimizadas. La investigación aspira a que estos hallazgos sirvan como referencia para futuras investigaciones y para el desarrollo de alternativas que permitan mejorar las condiciones y eficiencia de la perforación diamantina, considerando también un uso responsable de los recursos y una adecuada gestión de los posibles impactos asociados al proceso.

Referencias

- Altamirano, B., & Coba, V. (2021). *Influencia de los parámetros técnicos de perforación diamantina y aire reverso para disminuir costos por desviación de sondajes en un proyecto minero de Cajabamba 2020* [Tesis, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Antamina. (2025). *Historia*. Antamina.
- Bajerano, V. (2017). *Proceso de perforación diamantina y logueo geológico en el proyecto minero La Granja Río Tinto en Querecoto–Chota–Cajamarca* [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín].
- Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Condori, A., & Satalaya, R. (2022). *Propuesta de optimizar la exploración utilizando perforación diamantina en la contrata minera MDH PD SAC–Unidad minera Cerro de Pasco, 2022* [Tesis, Universidad César Vallejo].
- Garay, H. Z. (2014). *Análisis de vías de agua de brocas de perforación diamantina mediante simulación numérica* [Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Marine Resources. (2020, 19 de diciembre). *Yacimientos mineros en Perú: Todo sobre reservas*. <https://mine-ramarineresources.com/yacimientos-mineros-peru-todo-reservas/>

- Porras Cristóbal, L. A. (2024). *Influencia de los tipos de brocas en la perforación diamantina de la veta Margot-CIA minera Raura-Oyón-2024* [Tesis, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Salas, A. (2016). *Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC* [Tesis, Universidad Andrés Bello].
- Altamirano, B., & Coba, V. (2021). *Influencia de los parámetros técnicos de perforación diamantina y aire reverso para disminuir costos por desviación de sondajes en un proyecto minero de Cajabamba 2020* [Tesis, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Antamina. (2025). *Historia*. Antamina.
- Bajerano, V. (2017). *Proceso de perforación diamantina y logueo geológico en el proyecto minero La Granja Río Tinto en Querecoto-Chota-Cajamarca* [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín].
- Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Condori, A., & Satalaya, R. (2022). *Propuesta de optimizar la exploración utilizando perforación diamantina en la contrata minera MDH PD SAC-Unidad minera Cerro de Pasco, 2022* [Tesis, Universidad César Vallejo].
- Garay, H. Z. (2014). *Análisis de vías de agua de brocas de perforación diamantina mediante simulación numérica* [Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú].

- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Marine Resources. (2020, 19 de diciembre). *Yacimientos mineros en Perú: Todo sobre reservas*. <https://mine-ramarinresources.com/yacimientos-mineros-peru-todo-reservas/>
- Porras Cristóbal, L. A. (2024). *Influencia de los tipos de brocas en la perforación diamantina de la veta Margot-CIA minera Raura-Oyón-2024* [Tesis, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Salas, A. (2016). *Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC* [Tesis, Universidad Andrés Bello].
- Altamirano, B., & Coba, V. (2021). *Influencia de los parámetros técnicos de perforación diamantina y aire reverso para disminuir costos por desviación de sondajes en un proyecto minero de Cajabamba 2020* [Tesis, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Antamina. (2025). *Historia*. Antamina.
- Bajerano, V. (2017). *Proceso de perforación diamantina y logueo geológico en el proyecto minero La Granja Río Tinto en Querecoto-Chota-Cajamarca* [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín].
- Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid.

- Condori, A., & Satalaya, R. (2022). *Propuesta de optimizar la exploración utilizando perforación diamantina en la contrata minera MDH PD SAC–Unidad minera Cerro de Pasco, 2022* [Tesis, Universidad César Vallejo].
- Garay, H. Z. (2014). *Análisis de vías de agua de brocas de perforación diamantina mediante simulación numérica* [Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Herrera Herbert, J., & Castilla Gómez, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Marine Resources. (2020, 19 de diciembre). *Yacimientos mineros en Perú: Todo sobre reservas*. <https://mine-ramarineresources.com/yacimientos-mineros-peru-todo-reservas/>
- Porras Cristóbal, L. A. (2024). *Influencia de los tipos de brocas en la perforación diamantina de la veta Margot–CIA minera Raura–Oyón–2024* [Tesis, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Salas, A. (2016). *Análisis y mejora de la calidad en el proceso de perforación en diamantina utilizando la metodología DMAIC* [Tesis, Universidad Andrés Bello].



Religación
Press
Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9907-845-32-7



9 789907 845327