

Sebastián Osorio¹, Jonathan Calle², Miguel Pineda³, Stefany Castro⁴

¹ Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú (sosorioa@fmi.com)

² Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú (jcallegu@fmi.com)

³ Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú (mpinedav@fmi.com)

⁴ Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú (scastroc2@fmi.com)

RESUMEN

Sociedad Minera Cerro Verde (SMCV), unidad minera ubicada al sur del Perú, es un productor de concentrados de cobre y molibdeno y cátodos de cobre, catalogado como segundo mayor productor de cobre del Perú es también una de las operaciones mineras con mayor instrumentación hidrogeológica operativa del país, cuenta con una amplia red de monitoreo hidrogeológico que permite un seguimiento detallado de las condiciones de calidad y niveles de agua subterránea alrededor de cada componente crítico como las pilas de lixiviación, depósitos de desmonte y presas de relaves, así como también las quebradas de posible impacto ambiental. En las fases operativas de los tajos, el monitoreo hidrogeológico permite realizar el minado seguro garantizando la estabilidad de los taludes, permitiendo un mayor ángulo de inclinación y logrando así incrementar el tonelaje de mineral extraído de mayor profundidad en menor tiempo.

Sociedad Minera Cerro Verde cuenta con un nivel de monitoreo completamente automatizado, el resultado final se presenta en una plataforma digital dinámica de visualización de resultados de calidad y niveles de agua subterránea (Dashboard) en tiempo real, permitiendo así un seguimiento constante y la identificación de algunas variaciones en los parámetros más relevantes, pudiendo ejecutarse respuestas inmediatas ante cualquier alerta o cambio de las condiciones del agua subterránea o parámetro hidroquímico.

El nivel de instrumentación automatizada de Sociedad Minera Cerro Verde se basa en las combinaciones de captura y almacenamiento de datos y las combinaciones de cobertura de señal según disponibilidad en diferentes sectores de la mina. El flujo de datos comienza desde la lectura del sensor, en

seguida la información se almacena en el datalogger, luego es transmitido a través de un sistema de comunicación y se carga en una base de datos específica, posteriormente se integran todas las fuentes de información para realizar el modelado y análisis de datos para finalmente compartir los resultados a través de un dashboard en línea con todas las personas involucradas en el monitoreo hidrogeológico.

1. Introducción

En Sociedad Minera Cerro Verde se establece la “Excelencia Ambiental” como parte fundamental de la misión de la organización, en tal sentido, SMCV cuenta con una amplia red de monitoreo hidrogeológico que tiene como objetivo ejecutar un seguimiento detallado de las condiciones de calidad y niveles de agua subterránea en toda la operación.

Actualmente la red de monitoreo hidrogeológico consta de una gran cantidad de estaciones de monitoreo, entre piezómetros tipo Casagrande, cuerda vibrante y pozos de retro bombeo, catalogando a SMCV como una de las minas con mayor instrumentación hidrogeológica operativa en Perú. Las estaciones de monitoreo se encuentran asociadas a los diferentes componentes mineros que forman parte de las operaciones de SMCV, dentro de los cuales podemos mencionar: depósitos de relaves, pilas de lixiviación, depósitos de desmontes, tajos de minado e inclusive la Central Termoeléctrica Recka ubicada en la ciudad de Chiclayo, Perú. SMCV tiene implementado en las estaciones de monitoreo claves, sistemas remotos de colección y envío de información hidrogeológica mediante telemetría satelital, GPRS y mesh (wifi), con la finalidad de automatizar el monitoreo e incrementar la capacidad de respuesta ante variaciones en el agua subterránea circundante a sus operaciones.

Con el principal objetivo de contar con una herramienta optimizada para el monitoreo hidrogeológico y la interpretación de datos para la toma de decisiones con celeridad, SMCV ha desarrollado una plataforma digital dinámica de visualización de resultados de calidad y niveles de agua subterránea o “Dashboard”, que permite un seguimiento constante de las variaciones de los parámetros más relevantes en las características de las aguas subterráneas. Esta herramienta es clave para que el personal encargado del control de aguas subterráneas pueda tener acceso en tiempo real y pueda tomar decisiones inmediatas y proactivas ante una posible variación que pudiese afectar la calidad del medio ambiente.

2. Monitoreo de agua subterránea en Cerro Verde

2.1. Geología e hidrogeología de la mina Cerro Verde

La mina Cerro Verde ubicado en el distrito de Uchumayo, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, Perú, es, desde un punto vista geológico, un pórfido de cobre - molibdeno emplazado en plutones granodioríticos del Cretácico superior pertenecientes al Batolito de la Costa. La roca encajonante comprende en gran proporción a la Granodiorita Tiabaya por el noreste y a la Granodiorita Yarabamba por el suroeste, adicionalmente se presentan en menor extensión remanentes del Complejo Basal de la Costa como el Gneis Charcani del Precámbrico subyacente a áreas menores de Volcánicos Chocolate del Jurásico inferior y Formación Socosani y Grupo Yura del Jurásico medio localizados hacia el norte y oeste del distrito minero.

Regionalmente Cerro Verde se ubica en la Región Hidrogeológica del Pacífico, y presenta acuíferos de tipo fisurados y aislados, de muy baja permeabilidad debido a la predominancia de rocas cristalinas en el área. Las discontinuidades y fallas observadas son de poca potencia y en gran medida se encuentran rellenadas o selladas siendo así poco conductivas reflejándose en el bajo flujo y poco movimiento del agua subterránea en el distrito minero. Excepcionalmente, en las fases operativas del tajo y sus alrededores se observan descensos de niveles asociados a la despresurización de los taludes con el objetivo de reducir las presiones de poros y mejorar el factor de estabilidad geotécnico, obteniendo así condiciones mucho más seguras para el minado.

El agua subterránea es producto de la infiltración hacia el subsuelo saturando las fracturas de las rocas y los poros de los materiales geológicos, fluye muy lentamente y puede alimentar afloramientos y pozos (U.S. Geological Survey [USGS], 2018).

El tipo de agua presente en el sector, según las facies hidroquímicas de Back (1961), varía desde clorurada – cálcica - sódica hasta sulfatada cálcica – sódica, de acuerdo con la posible fuente de iones que fundamentalmente se compone de minerales ferromagnesianos y feldespatos presentes en las rocas ígneas granodioríticas e intrusivos porfiríticos (Singhal y Gubta, 2010) así como la presencia de materiales evaporíticos en algunos sectores. Diversos estudios internos realizados con el fin de conservar la calidad ambiental del acuífero natural circundante a la mina Cerro Verde, indican que los iones presentes en general son de baja movilidad relativa en la hidrosfera, a excepción de cloruros y sulfatos los cuales según Singhal y Gubta (2010) presentan mayor movilidad teórica en el agua subterránea, que sin embargo en los modelos hidrogeológicos de transporte de solutos desarrollados en Cerro Verde indican incipiente migración en régimen transitorio debido a la baja transmisibilidad del acuífero.

2.2. Monitoreo hidrogeológico del agua subterránea

En las operaciones mineras a tajo abierto es necesario realizar el seguimiento del comportamiento del agua subterránea desde un punto vista geotécnico y desde un punto de vista ambiental. Los requerimientos para realizar diferentes actividades de minado, apilamiento de mineral o desmonte y la deposición de relaves requieren de estudios hidrogeológicos previos que den a conocer las condiciones de estabilidad del terreno donde se va a emplazar la infraestructura minera, adicionalmente brinda información sobre la línea base de la calidad natural del agua subterránea antes del inicio de las labores de minado o de deposición. Posteriormente se continúa con el monitoreo y control de los cambios en el agua subterránea para garantizar condiciones geotécnicas seguras y la no perturbación del acuífero evitando impactos ambientales a causa de las labores realizadas durante la operación.

2.2.1. Monitoreo hidrogeotécnico

Generalmente se realiza a través de la instalación de piezómetros sobre o alrededor de los componentes mineros, la medición continua de los niveles de agua en los piezómetros instalados nos indica la condición de las presiones de poros de la roca, suelo o material apilado. Los cambios de nivel de agua observados permiten conocer los cambios de presión hidráulica ejercida en los poros que impacta directamente en la estabilidad o inestabilidad de un talud natural o conformado, lo que finalmente desencadena en un plan de acción para reducir condiciones de inestabilidad o en caso contrario permite un margen de

condición segura para continuar con los trabajos de excavación, apilamiento o construcción.

En Cerro Verde, el monitoreo hidrogeotécnico constante permite realizar un minado en condiciones seguras con los taludes estables y ejecutar planes de acción si es que existiera algún incremento significativo en las presiones ejercidas por el agua subterránea. Además, permite mantener las fases de minado en condiciones secas para una mejor operación de los equipos y un mejor desempeño de los explosivos en la desfragmentación del mineral. Y finalmente brinda la posibilidad de inclinar las paredes del tajo con un mayor ángulo con el fin de extraer mayor tonelaje de mineral en profundidad en menor tiempo, lo cual se traduce en un ahorro de costos significativo.

2.2.2. Monitoreo ambiental de calidad de agua

El enfoque ambiental del monitoreo hidrogeológico se basa en el registro histórico de los cambios de la calidad natural del agua subterránea, ello nos permite conocer si es que existen impactos ambientales a causa de las actividades propias de la minería sobre los acuíferos circundantes a la operación. Sin embargo, es indispensable contar con planes de acción antes de iniciar las actividades que puedan ser ejecutados inmediatamente después de registrar los cambios en la calidad del agua o inmediatamente después de detectar tendencias crecientes o decrecientes durante el monitoreo.

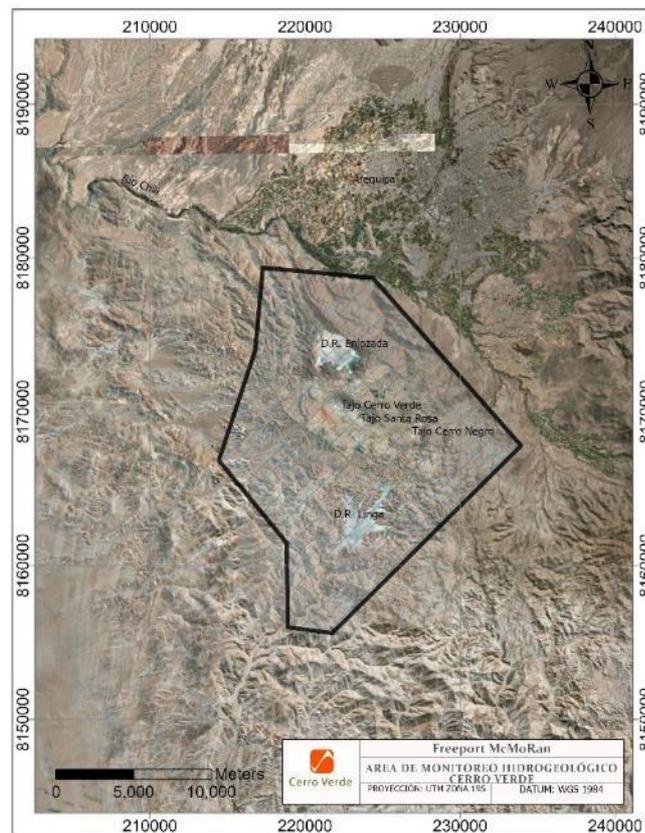
En Cerro Verde se realiza el monitoreo ambiental de la calidad del agua subterránea mediante la instalación de piezómetros alrededor de los componentes críticos como las pilas de lixiviación, depósitos de desmonte y presas de relaves, y a lo largo de las quebradas identificadas como áreas de posible impacto según los instrumentos ambientales presentados a la autoridad. Ello permite demostrar que los valores registrados se encuentran dentro los parámetros ambientales más exigentes, acorde a la misión de la organización: "Excelencia ambiental", sin perturbar la calidad natural del acuífero circundante a la operación minera, cumpliendo los compromisos asumidos frente a la población y la autoridad.

2.3. Infraestructura hidrogeológica

2.3.1. Piezómetros de monitoreo

Distintos tipos de piezómetros pueden ser diseñados e instalados con diferentes objetivos hidrogeológicos, geotécnicos y/o ambientales. En Cerro Verde se encuentran principalmente 02 tipos de piezómetros: Piezómetros tipo Casagrande y Piezómetros de Cuerda Vibrante. Los piezómetros tipo Casagrande son de tubería abierta, con tramos de tubería ranurada y

ciega, definidas durante el diseño del piezómetro, y los piezómetros de cuerda vibrante son sensores que se instalan a determinada profundidad, basado en los objetivos de monitoreo y luego se sellan para asegurar que la medición represente la cota a la que se aloja el sensor.



Mapa 01: Área de monitoreo hidrogeológico Cerro Verde, comprende más de 267 km² que incluyen a las áreas operativas y las quebradas aledañas asociadas a los componentes mineros principales.

Actualmente Cerro Verde tiene instalados una gran cantidad de piezómetros activos que cubren más de 267 km² de área de interés hidrogeológico (Ver Mapa 01), sin embargo, si se contabiliza también los piezómetros inactivos que ya han sido sellados o afectados por el minado, entonces el registro histórico indica que se han instalado en total más del doble de piezómetros a lo largo de todo el área de monitoreo hidrogeológico hasta la actualidad, de los cuales se tiene una gran cantidad de información histórica almacenada en la base de datos, cuya data se viene incrementando continuamente con los nuevos datos registrados mediante el monitoreo realizado por el equipo de hidrogeología. La gran cantidad de piezómetros y la data acumulada, cataloga a Cerro Verde como una de las minas con mayor red de monitoreo hidrogeológico del Perú, y surge la necesidad de establecer un sistema de gestión de datos

robusta y confiable que permita almacenar gran cantidad de información, integrar diversas fuentes y tener la capacidad de procesar e interpretar con celeridad para la toma de decisiones.

2.3.2. Pozos de bombeo

En la mina Cerro Verde se tienen algunos pozos de retrobombeo instalados en el tajo, orientados a la extracción de agua para la despresurización y estabilización de taludes, además se cuentan con un número considerable de pozos que forman parte de los sistemas de retrobombeo instalados en sectores clave junto a componentes principales como depósitos de relaves y otra infraestructura hidráulica relevante.

2.4. Instrumentación hidrogeológica

2.4.1. Sensores de monitoreo hidrogeológico

Con el fin de realizar el monitoreo del agua subterránea existe una gran variedad de sensores desarrollados con objetivos de monitoreo hidrogeotécnico o ambiental. Para la medición del nivel de agua dentro de un piezómetro o un pozo es común utilizar sondas de nivel que cuentan con un sistema electrónico que es capaz de identificar cuando el electrodo se encuentra en contacto con el agua. Un segundo tipo de equipos con el mismo fin son los sensores de nivel que se sumergen a mayor profundidad y registran la presión hidrostática y permiten calcular directamente el nivel de agua en función a la altura de la columna de líquido. Y en tercer lugar podemos disponer de sensores de cuerda vibrante que registran la presión de poros relacionada directamente con la presencia de un nivel de agua subterránea, este tipo de sensor se instala permanentemente dentro de una perforación y se aísla con un sello artificial tal que permita realizar mediciones de la presión de poros desde la superficie. En caso se requiere la medición de parámetros químicos o fisicoquímicos del agua subterránea, es común utilizar sensores multiparámetro que puedan sumergirse e instalarse dentro de un piezómetro o pozo, con el objetivo de realizar lecturas puntuales o programadas con una frecuencia de lectura constante. En ambos casos existen muchos tipos de sensores disponibles en el mercado.

2.4.2. Datalogguer

Los datalogguer son memorias físicas de almacenamiento de datos temporales, generalmente están conectados a las lecturas inmediatas que provienen de los sensores hidrogeológicos.

2.4.3. Sistemas de comunicación remota

Los sistemas de comunicación remota permiten coleccionar o transmitir los datos desde diferentes puntos de monitoreo hasta una base de datos centralizada, se caracteriza por brindar cobertura de conectividad al terreno como el cable de red o fibra óptica, bluetooth, red wifi o mesh, radio, GPRS o señal satelital. La selección de un sistema de comunicación para el monitoreo hidrogeológico dependerá de las condiciones del terreno, la accesibilidad y la disponibilidad de recursos.

2.4.4. Almacenamiento e integración de datos

La información coleccionada de diversos instrumentos instalados en el campo debe ser centralizada y almacenada en bases de datos seguras y confiables que garanticen la calidad de los datos históricos y permitan realizar un control de calidad antes y después de guardar la información. Existen diversas alternativas informáticas para esta tarea, pero podríamos resumirlas en dos grandes grupos, bases de datos estructuradas (SQL) y bases de datos no estructuradas (Not Only SQL), las cuales deben implementarse de acuerdo con la forma de colección e integración de los datos de diversos instrumentos en campo e incluso desde otras bases de datos intermedias o temporales antes de una base de datos principal; también debe considerarse la frecuencia de lectura de nuevos datos, que implica estimar la cantidad de bytes por unidad de tiempo que se añadirá en la base de datos.

Actualmente, uno de los mayores problemas en la industria minera es el hecho de contar con distintos lugares de almacenamiento de datos, en diferentes niveles y diferentes áreas, por ejemplo, es posible que una serie de datos coleccionados por un servicio de telemetría satelital se encuentre en una base de datos en la nube al cual se tiene acceso a través de una plataforma virtual haciendo uso de un usuario y una contraseña, y es probable que otros datos coleccionados por la red local sean almacenados en un base de datos local o un servidor SQL compartido; estas diversas maneras y lugares para almacenar los datos representan un primer problema para la ingeniería de datos, es por ello que actualmente es necesario hablar sobre la "Integración de datos" con el objetivo de coleccionar información de diversas fuentes de manera automática para luego procesar y analizar aplicando la ingeniería de datos.

2.4.5. Configuración óptima e implementación

La elección del nivel óptimo para la instalación de los instrumentos descritos previamente está condicionada por los objetivos de monitoreo y los recursos disponibles, muchas veces limitada por la cobertura del

sistema de comunicación, cuya selección es clave para definir si es posible llegar a un nivel de monitoreo autónomo sin la intervención de personal de campo (Ver Fig. 01).

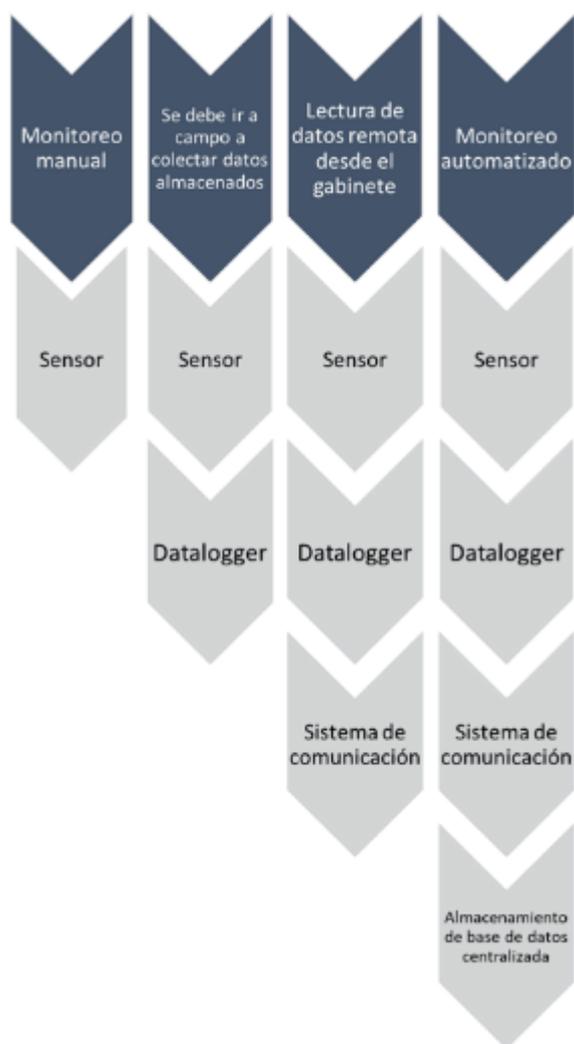


Fig. 01: Niveles de configuración de los instrumentos de un sistema de monitoreo hidrogeológico, la elección del nivel óptimo estará directamente relacionada a los alcances de monitoreo definidos y los recursos con los que se cuentan para su implementación (Fuente: Elaboración propia).

La experiencia en Cerro Verde indica que siempre es posible llegar a un nivel de monitoreo completamente automatizado, cada vez que sea necesario se pueden realizar combinaciones de diferentes niveles de configuración según sectores de la mina, dependiendo de la disponibilidad de cobertura de señal de algún tipo. Además, es posible realizar el almacenamiento en diversas fuentes de datos primarios, para luego realizar la “integración” y obtener una base de datos centralizada.

3. Integración e ingeniería de datos

3.1. Flujo de datos

La integración de los datos almacenados en diversas fuentes de datos es la clave para iniciar un proyecto de ingeniería de datos autónomo. La autonomía en este nivel se refiere a que los resultados de los análisis realizados deben ser capaces de actualizarse automáticamente y en tiempo real para que los usuarios puedan estar atentos a los cambios que puedan presentarse y recibir notificaciones inmediatas si se registra algún cambio significativo en las condiciones del agua subterránea.



Fig. 02: Infraestructura de monitoreo hidrogeológico de calidad de agua subterránea en un piezómetro. La instrumentación automatizada consiste en: (1) Datalogger y sistema de comunicación por telemetría satelital instalada junto al piezómetro debidamente estandarizado y alimentado por un panel solar. (2) Sensor multiparámetro sumergido en el piezómetro de tubería abierta para el registro continuo de datos. (3) Detalle de sensor multiparámetro con capacidad de lectura de pH, conductividad eléctrica, nivel de agua y temperatura (SMCV, 2022).

En un típico sistema de monitoreo automatizado (Ver Fig. 02), el flujo de datos comienza desde la lectura del sensor y el almacenamiento de esta información en el datalogger instalado en el campo, que luego será transmitido a través de un sistema de comunicación, para finalmente ser almacenado en una base de datos como tal. La etapa siguiente pertenece al campo de la ingeniería de datos, donde la información de diversas fuentes requiere ser integrada para su análisis (Ver Fig. 03), es necesario integrar todas las fuentes de información hidrogeológica e incluso otro tipo de información que puede encontrarse en bases de datos de otras áreas como operaciones mina, despacho, geotecnia, etc.; en esta etapa es necesario establecer un flujo automático de datos que garantice la

integración en tiempo real cada vez que haya nueva información o cambios en la base de datos original. El flujo de datos continúa con la aplicación de algoritmos para el análisis de datos y la publicación de resultados en reportes automáticos generalmente “Dashboards” que se puedan actualizar automáticamente y ser compartidos con los usuarios finales interesados en el monitoreo hidrogeológico.

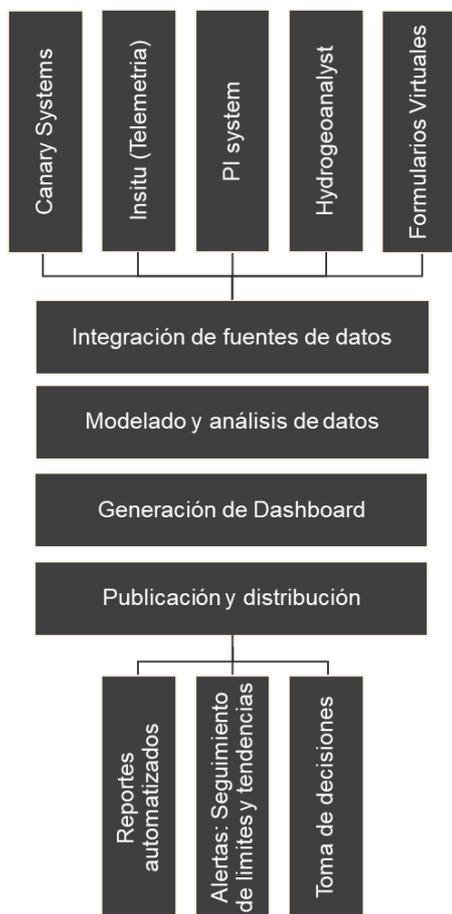


Fig. 03: Flujo de datos para la generación de Dashboard y publicación en mina Cerro Verde (Fuente: Elaboración propia).

En Cerro Verde los datos hidrogeológicos integrados provienen de las siguientes fuentes:

- Canary Systems
- In-Situ: Telemetría Satelital
- PI System
- Snowflake
- Hydrogeanalyst (HGA) - SQL Database
- Formularios Virtuales de Campo

La variedad de fuentes de datos requiere de una robusta técnica de minado de datos, su posterior modelado y análisis están condicionados a la calidad de integración que a su vez depende de permisos de acceso, frecuencia de actualización, y capacidad de las

puertas de acceso para transmitir en tiempo real grandes cantidades de datos desde la fuente.

3.2. Análisis de datos hidrogeológicos

El análisis exploratorio de datos (EDA por sus siglas en inglés) se usa para explorar y presentar iterativamente diversos gráficos, hasta entender claramente las características más importantes de la data, por ejemplo, valores atípicos debido a la mala calidad de la data, la independencia o autocorrelación de los datos y el cambio de patrones debido a factores externos como la aplicación de diferentes técnicas de muestreo. EDA es el punto de partida para cualquier proyecto de análisis de datos hidrogeológicos.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, se grafican los patrones de concentraciones relativas de diferentes iones en términos de mg/L o meq/L, con el objetivo de caracterizar la calidad del agua, esto incluye a los diagramas de barras de Collins, diagramas de Stiff, diagramas de Schoeller, diagramas de Hill-Piper, diagramas de Durov, etc. (Singhal y Gubta, 2010).

El monitoreo hidrogeológico deriva en el análisis de la evolución temporal de los datos hidrogeológicos, en tal sentido, desde un punto de vista transitorio, el análisis de series temporales incluye entre otros a los análisis de tendencias y los límites de tolerancia y control.

3.2.1. Análisis de Tendencias

Los cambios en una serie de datos temporales que representa una variable natural del agua subterránea ocurren de manera gradual (tendencia) y pocas veces abruptamente o en alguna otra forma más compleja, esto afecta al promedio, mediana, varianza y otras medidas estadísticas que además son sensibles a datos atípicos o extremos (Grayson y otros, 1996). El enfoque del análisis de tendencias es a largo plazo, deseamos conocer la dirección y la tasa de cambio en la tendencia central durante algún período de interés de varios años, considerando que pueden existir componentes estacionales de ciclos regulares como la precipitación o componentes externos como una infiltración de origen antrópico que influyen en la tendencia. Si pudiéramos medir la variable de interés a una tasa de muestreo infinitamente alta y con una precisión perfecta, es prácticamente seguro que concluiríamos que existe alguna tendencia a lo largo del tiempo. Pero no tenemos el lujo de tener tasas de muestreo infinitamente altas o mediciones perfectas, por lo que se necesitan métodos de análisis estadístico de tendencias, para estimar la tasa de cambio en la tendencia central y estimar nuestra incertidumbre sobre esa tasa de cambio. En particular, queremos que nuestros métodos eviten llegar a una conclusión

errónea sobre el signo de la pendiente de la tendencia (por ejemplo, concluimos que está aumentando cuando, de hecho, está disminuyendo) (McBride y otros, 2014). Helsel y otros (2020) clasifican los métodos de análisis de tendencia para agua subterránea de acuerdo con la tabla 01, según la parametrización o no parametrización de datos y según la consideración o no consideración de las variables externas. Los métodos paramétricos asumen que la data de la serie temporal y los valores atípicos siguen una distribución en particular, en la mayoría de los casos asumen que la distribución es normal; adicionalmente las pruebas de tendencia paramétricos pueden cuantificar el grado de cambio en la tendencia y son más poderosos que las pruebas de tendencia no paramétricos. Por el contrario, los métodos no-paramétricos son generalmente de libre distribución, pueden detectar las tendencias y los cambios en las tendencias, pero no cuantificar el grado, y son los más usados en las series temporales del agua subterránea debido a que la mayoría de los datos hidrogeológicos no muestran una distribución normal (Chiew, 2020). La razón de considerar variables externas (por ejemplo, las precipitaciones o las infiltraciones de origen antrópico) es que pueden explicar la varianza de variable de respuesta (por ejemplo, la precipitación puede explicar la estacionariedad de los cambios de nivel de agua en los piezómetros en cada periodo de lluvias) haciendo que el método de análisis de tendencia sea más robusto.

Tipo de análisis de tendencia	No se considera variables externas, X	Se considera variables externas, X
No paramétrico	Análisis de tendencia Mann-Kendall de Y	Análisis de tendencia Mann-Kendall sobre el residual R de un loess* de Y sobre X
Mixto		Análisis de tendencia Mann-Kendall sobre el residual R de una regresión de Y sobre X
Paramétrico	Regresión de Y sobre T	Regresión de Y sobre X y T

* loess: Suavizado local de diagrama de dispersión.

Tabla 01: Y es la variable aleatoria que es la variable de interés en el análisis de tendencias. X es la variable externa que afecta a la variable Y. R son los residuos de una regresión o pérdida de Y versus X. T es el tiempo (Helsel y otros, 2020).

Por ejemplo, en el análisis de tendencias de la calidad del agua subterránea, Y sería la concentración de algún parámetro químico de interés, X sería el flujo de infiltración antrópica o el flujo de descarga hacia el acuífero y R podría ser la concentración del parámetro hidroquímico ajustado al flujo de infiltración.

3.2.2. Límites de tolerancia y control

En el monitoreo ambiental es común establecer umbrales de tolerancia basados en estándares dictados por la legislación de un estado o región, por ejemplo, en el caso del Perú se define el estándar de calidad ambiental (ECA) para cuerpos receptores y límites máximos permisibles de (LMP) para posibles fuentes de emisión o descarga, que permiten fiscalizar los compromisos ambientales asumidos por la actividad industrial (MINAM, 2019). Pero en el caso de aguas subterráneas no se ha establecido aún legislación alguna que indique umbrales de medida de concentración de elementos o parámetros enfocados al cuidado del medio ambiente y la salud de las personas. Desde el punto de vista hidrogeotécnico, es posible establecer umbrales a los niveles de agua y presión de poro en base a objetivos establecidos en simulaciones numéricas para un contexto específico. Finalmente, es posible establecer umbrales y límites tomando en cuenta la serie temporal y las medidas estadísticas basto conocidas que involucran al promedio, mediana, cuantiles, desviación estándar y/o una combinación de estas de acuerdo con un criterio previamente establecido.

4. Dashboard Monitoreo Hidrogeológico - Cerro Verde

Un dashboard es la mejor manera de mostrar una serie de resultados de un proyecto de análisis de datos, tiene la cualidad de entregar eficientemente la información, de una forma clara, precisa y concisa para la toma de decisiones basada en datos, además puede contener controles dinámicos e intuitivos que permite a los usuarios y clientes interactuar con el panel de datos.

En SMCV se ha implementado un conjunto de dashboards orientados al monitoreo hidrogeológico. Para llegar a este nivel se han desarrollado previamente todos los pasos descritos a lo largo de este artículo, comenzando por la optimización de los instrumentos instalados en campo, luego la coordinación con el área de informática para completar la cobertura de señal y transmitir la información a las bases de datos destinadas para cada nivel de configuración de instrumentos. Posteriormente, se han integrado las fuentes de datos mostradas en la figura 03, para finalmente ser analizadas y compartidas a través de dashboards.

El uso de esta nueva herramienta implementada en el monitoreo hidrogeológico representa enormes beneficios para la organización respecto a la gestión de información y la respuesta inmediata que pueda brindarse ante alertas o cambios en las condiciones del agua subterránea; por ejemplo, anteriormente, para

conocer un cambio significativo de algún parámetro hidroquímico, era necesario recopilar los archivos de datos de las fuentes, luego probablemente compartir los datos con algún especialista que realice el análisis y emita un reporte para que las personas encargadas en la toma de decisiones puedan hacerlo, pasando así varios días después de haberse registrado los datos de campo; actualmente el flujo de datos es en tiempo real, el análisis de datos se ejecuta inmediatamente después

de que la nueva data es ingresada a la base de datos integrada y los resultados son automáticamente visualizados en el dashboard en línea, el cual está disponible en la web interna de la compañía, permitiendo que los interesados en el monitoreo hidrogeológico puedan tener acceso en tiempo real a los datos actualizados y procesados desde cualquier lugar y en cualquier horario.

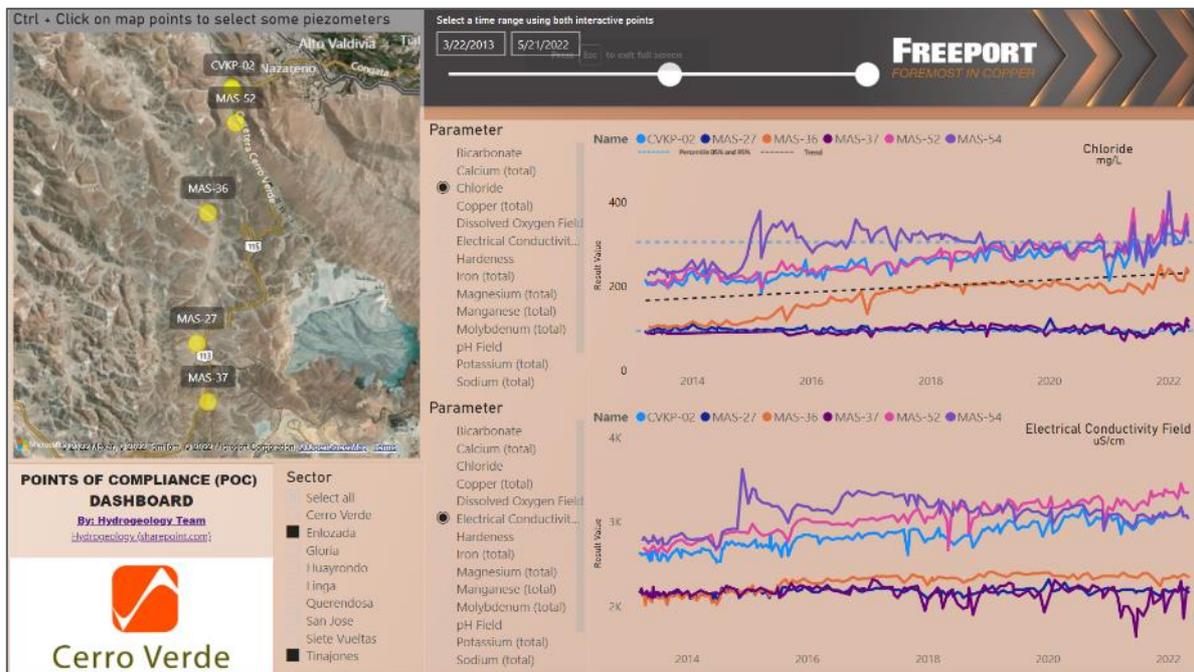


Fig. 04 : Dashboard Puntos de Complacencia, desarrollado por el área de hidrogeología de SMCV (2020).

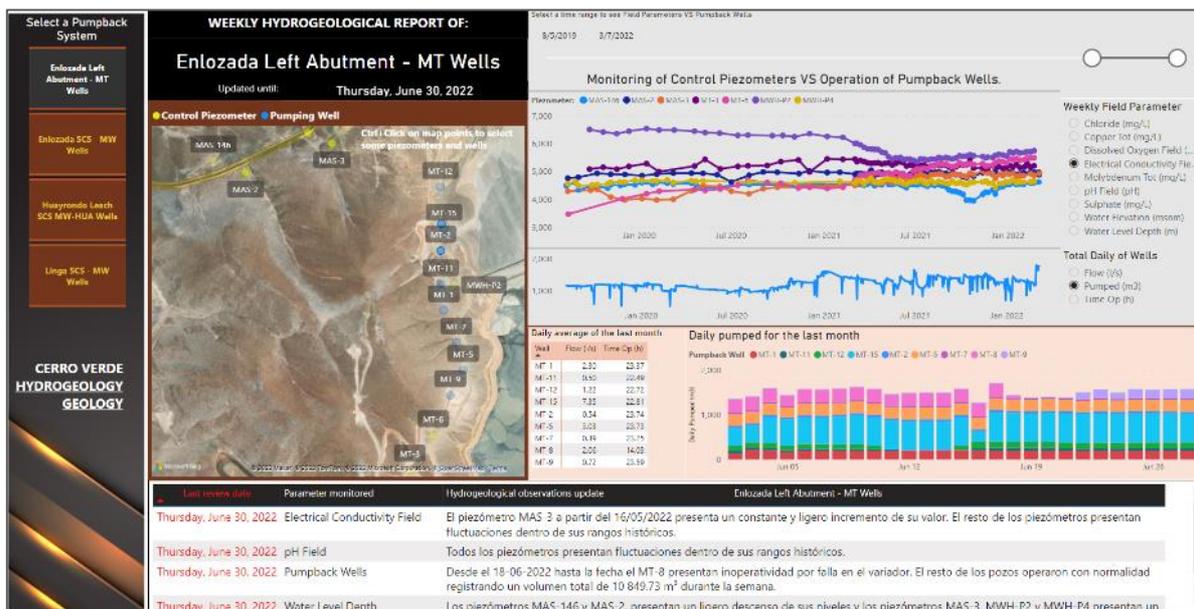


Fig. 05 : Dashboard sistemas de retrobombeo y piezómetros de control, desarrollado por el área de hidrogeología de SMCV (2020).

En la figura 04 se muestra el Dashboard de Puntos de Complacencia desarrollado por SMCV orientado al monitoreo y control ambiental de la calidad de agua

subterránea. La instrumentación hidrogeológica comprende una serie de piezómetros reportables a la autoridad, que tienen instalados sensores multiparámetro de calidad de agua (conductividad

eléctrica, pH y temperatura) y cuentan con un sistema de telemetría satelital que garantiza la cobertura de señal para transmisión de datos en tiempo real, incluso en sectores donde no existe cobertura celular o de radio por la abrupta topografía de las quebradas, los datos se gestionan a través de la plataforma In-Situ que representa la primera fuente de datos para el desarrollo del dashboard. Adicionalmente, se realiza el muestreo semanal y mensual para analizar muestras en un laboratorio externo acreditado de hasta 54 parámetros hidroquímicos los cuales incluyen metales totales y disueltos, cloruros, sulfatos, sólidos disueltos, dureza, etc., los resultados de laboratorio se almacenan en una base de datos SQL (Hydrogeoanalyst) localizado en el servidor de la corporación el cual representa una segunda fuente de datos para el dashboard. Para la elaboración se integran las dos fuentes de datos y se realiza el procedimiento de modelado, análisis exploratorio de datos (EDA), generación de gráficos de series temporales, incluyendo análisis de tendencias basado en métodos no paramétricos y límites basados en cuantiles, según lo expuesto en los capítulos 3.2.1 y 3.2.2, para el control de cambios significativos, luego se diseña el panel que incluye un mapa dinámico, en el que se puede seleccionar los puntos de monitoreo, sectores de ubicación de puntos, parámetros hidroquímicos y una línea temporal dinámica que permite seleccionar intervalos de tiempo de interés a visualizar.

En la figura 05 se presenta el dashboard de monitoreo de la operatividad de los sistemas de retrobombeo y la calidad de agua en los piezómetros de control. La instrumentación consiste en un conjunto de piezómetros tipo Casagrande, en los cuales se han instalado sensores de nivel y sensores multiparámetro automáticos. Una segunda fuente de datos es la que se captura de los flujómetros y sensores de nivel instalados en los pozos de bombeo, que nos permiten conocer el caudal de operación, las horas de funcionamiento al día y el nivel de agua dinámico dentro del pozo. La información se transmite a través de fibra óptica desde los pozos hasta los servidores de PI System que es un sistema de big data NO-SQL utilizada en los procesos más complejos de las áreas operativas de la mina. Además, se cuenta con una tercera fuente de datos que proviene del soporte de personal técnico que realiza mediciones semanales en campo (Ver Fig. 06) y registra los datos en formularios digitales que se almacenan en la nube (Snowflake). Adicionalmente, se podría considerar como una cuarta fuente de datos a los comentarios realizados por los hidrogeólogos localizados en SharePoint. Para la elaboración del dashboard se integran todas las fuentes de datos luego se realiza el EDA y el modelado

de datos, para posteriormente graficar series temporales de caudal de bombeo diario correlacionados a los cambios en las series temporales de los parámetros hidroquímicos en los piezómetros de control, se incluye también una tabla resumen del promedio de rendimiento de los pozos y en la parte inferior se añade los comentarios más recientes emitidos por los hidrogeólogos. El dashboard cuenta con un sectorizador principal que nos permite navegar entre los cuatro sistemas de retrobombeo instalados en Cerro Verde junto a las principales infraestructuras monitoreadas, y para cada sector seleccionado se muestra en un mapa dinámico que permite seleccionar puntos específicos (pozos y piezómetros de control) para visualizar los datos a detalle, finalmente tiene una línea temporal para seleccionar el intervalo de tiempo que el usuario desee visualizar. Este dashboard contiene información actualizada, precisa y resumida de lo que está sucediendo en los sistemas de retrobombeo en cada instante, aprovechando al máximo la gran cantidad de información que se obtiene de las diversas fuentes de datos integradas.



Fig. 06: Trabajos de campo de personal técnico del equipo de hidrogeología Cerro Verde. (1) Medición adicional de nivel de agua en un piezómetro automatizado con el objetivo de calibrar los sensores y controlar la calidad de los datos. (2) Extracción de muestra de agua desde un piezómetro haciendo uso de bailer, con el fin de realizar ensayos en laboratorio acreditado para calidad de agua. (3) Detalle de piezómetro tipo Casagrande para toma de muestras. (4) Medición de control en pozo de retrobombeo (SMCV, 2022).

5. Conclusiones

Los Dashboard desarrollados por Sociedad Minera Cerro Verde logran un gran impacto en el desempeño ambiental de la mina, contribuyendo en la prevención y cuidado del medio ambiente entregando información precisa y concisa que mantiene informada a la operación sobre los posibles cambios en los parámetros monitoreados del agua subterránea y facilita la toma de decisiones inmediatas.

El monitoreo hidrogeológico, que comprende el monitoreo hidrogeotécnico y el monitoreo ambiental de calidad de agua, se desarrolla de mejor manera cuando se cuenta con un alto nivel de configuración autónoma. En tal sentido, en base a la figura 01, SMCV cuenta con un nivel de configuración completamente autónoma para la mayor parte de la red de instrumentación hidrogeológica, lo cual se ha logrado instalando sensores de presión de poro, nivel de agua y calidad de agua en la mayoría de los puntos de monitoreo, contando con distintas formas de cobertura de señal que incluye a la red mesh (wifi), GPRS y señal satelital en quebradas remotas y abruptas de difícil acceso.

Cada sistema de monitoreo configurado cuenta con una base de datos específica, donde se almacenan grandes cantidades de información tales como: Canary, In-Situ, PI-System, Snowflake e Hydrogeoanalyst. El desafío consistía en encontrar una forma de integrar todas estas fuentes de datos, es así como, Sociedad Minera Cerro Verde desarrolla un complejo trabajo de integración que involucra el desarrollo de scripts en SQL y Python para asegurar un flujo de datos confiable que garantiza la actualización automática y en la mayoría de las veces en tiempo real dependiendo del tipo de fuente de datos.

Los datos integrados requieren ser modelados y analizados de tal manera que permitan obtener resultados útiles, en tal caso, Sociedad Minera Cerro Verde recurre a la aplicación de algoritmos de la ingeniería de datos basados en Python y DAX en el entorno de Power BI, logrando desarrollar dashboards automatizados y optimizados para cada contexto.

Agradecimientos

Este artículo fue desarrollado con el apoyo de la Gerencia General Mina de Sociedad Minera Cerro Verde y la retroalimentación de todas las personas involucradas en el monitoreo hidrogeológico. Son invaluable los comentarios y sugerencias proporcionadas por el equipo de hidrogeología de Cerro Verde, a todos ellos gracias infinitamente.

Referencias

- Back, W. 1961. Techniques for mapping hydrochemical facies. US Geol. Surv. Prof. Paper 424-D.
- Chiew, Francis. 2020. Detecting trends in environmental time series data. Catchment Modelling School 05.
- Grayson, R.B., Argent, R.M., Nathan, R.J., McMahon, T.A. and Mein, R. 1996. Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia, 125 pp.
- Helsel, Dennis R., Robert M. Hirsch, Karen R. Ryberg, Stacey A. Archfield, and Edward J. Gilroy. 2020. Statistical Methods in Water Resources: Trend Analysis, p. 327-331.
- Kundzewicz, Z.W., Robson, A. (Editors). 2000. Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program – Water, WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO/TD 1013, Geneva, 157 pp.
- McBride, G. 2019. Has water quality improved or been maintained? A quantitative assessment procedure. Journal of Environmental Quality, v. 48, no. 2, p. 412–420.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) - Gobierno del Perú. 2021. Decreto Supremo que aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el periodo 2021-2023. Decreto Supremo Nº 020-2021-MINAM.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) - Gobierno del Perú. 2019. Resolución Ministerial Nº 269-2019-MINAM.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P. 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, p. 205-220.
- U.S. Geological Survey. 2018. Dictionary of Water Terms. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/dictionary-water-terms>

Perfil profesional:

Ingeniero geólogo graduado de la Universidad Nacional de Ingeniería, con más de 5 años de experiencia en geología de mina, exploraciones e hidrogeología, enfocado al modelado geológico y la ingeniería de datos aplicado a las geociencias.

Nombre del autor: Sebastián Osorio Atusparia

Cargo: Ingeniero Geólogo Junior II

Empresa: Sociedad Minera Cerro Verde

Correo electrónico: sosorioa@fmi.com

Teléfono / Celular: 989890478

Dirección: Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú.

Perfil profesional

Ingeniero geólogo graduado de la Universidad Nacional de San Agustín, con 15 años de experiencia en hidrogeología y trabajos de geología mina.

Nombre del coautor: Jonathan Pierre Calle Quito

Cargo: Hidrogeólogo Senior

Empresa: Sociedad Minera Cerro Verde

Correo electrónico: jcallequ@fmi.com

Teléfono / Celular: 914160643

Dirección: Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú.

Perfil profesional

Ingeniero geólogo graduado de la Universidad Nacional de San Antonio Abad, con 13 años de experiencia en hidrogeología.

Nombre del coautor: Miguel Angel Pineda Vivanco

Cargo: Ingeniero Hidrogeólogo II

Empresa: Sociedad Minera Cerro Verde

Correo electrónico: mpinedav@fmi.com

Teléfono / Celular: 966567524

Dirección: Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú.

Perfil profesional

Graduada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos con más de 2 años de experiencia en el área de Geotecnia, Hidrogeología y Geología Mina.

Nombre del coautor: Stefany Castro Carhuapoma

Cargo: Profesional en Entrenamiento

Empresa: Sociedad Minera Cerro Verde

Correo electrónico: scastroc2@fmi.com

Teléfono / Celular: 994441474

Dirección: Sociedad Minera Cerro Verde, Uchumayo, Arequipa, Perú.