UNIVERSIDAD DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL PIRHUA

METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE BALANCE DE AGUAS EN OPERACIONES MINERAS A TAJO ABIERTO

Enver Alvarado-Rodríguez

Lima, agosto de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Alvarado, E. (2017). Metodología del cálculo de balance de aguas en operaciones mineras a tajo abierto. En E. Carrera (Dir.), *I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos III Congreso Regional IPMA – LATNET*, (pp. 299-309). Lima: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y DIRECCIÓN DE PROYECTOS
III CONGRESO IPMA-LATNET

METODOLOGIA DEL CÁLCULO DE BALANCE DE AGUAS EN OPERACIONES MINERAS A TAJO ABIERTO

Enver Alvarado

Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Urb. San Eduardo, Av. Ramón Múgica 131, Piura, Perú.

Autor en correspondencia: Alvarado, Enver.
Correo electrónico: a_enver01@hotmail.com

Palabras clave: Minería, tajo abierto, Balance de aguas, Plan de cierre de minas, Plantas de Tratamiento de Aguas Acidas, GoldSim.

RESUMEN

La minería en el Perú es el sector más importante que contribuye a la economía del país, tanto en recaudación como en inversiones; siendo su contribución al PBI nacional alrededor del 15%, además de representar cerca del 60% de las exportaciones totales del Perú y el 30% de los ingresos por renta de tercera categoría (Diario Gestión, 2015).

Debido a que la mayor parte de la actividad minera, se da en las zonas altas del Perú, donde las precipitaciones son constantes dentro de un periodo estacional, es necesario deprimir el nivel freático en las áreas donde se extraerá el mineral, colocando un sistema de bombeo y llevando estas aguas para un posterior tratamiento y finalmente verterlas al medio ambiente cuidando la calidad y cantidad de la misma.

El presente documento plantea un modelo de balance de agua usando el software GoldSim de simulación dinámica probabilística con una base de datos histórica, que permitirá predecir los principales flujos de agua que componen el sistema de la mina a tajo abierto y así realizar un balance de agua optimo, de tal manera que no exceda la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas antes de su descarga al medio ambiente.

Keywords: open pit mining, water balance, mine Closure, Acid water Treatment Plant, GoldSim.

ABSTRACT

Mining is the most important sector in Peru because it contributes to the economy of the country, both in tax collection and investment; with a contribution to the national GDP of around 15%, in addition to representing about 60% of Peru's total exports and 30% of third-category income.

Due to the fact that the activity of large mining generally occurs in the high parts of Peru, where precipitation is seasonal and constant, where mining activity has to depress the water table in the areas where it is going to extract the mineral, placing a system of pumping and taking these waters to a later treatment depending on the quality of the same, it is there where the balance of waters of the whole system takes relevance by the quantity and quality of water that is going to be handled within the whole mine .

ISBN: 978-9972-48-190-1

This paper proposes a water balance model using the GoldSim probabilistic dynamic simulation software with a historical database, which will allow predicting the main water flows that make up the open pit mine system and thus perform a water balance Optimum, in such a way that it does not exceed the capacity of the water treatment plants before their discharge into the environment.

1 Justificación

De acuerdo al Informe Defensorial N°171 de la Defensoría del Pueblo, en el Perú se han identificado hasta el año 2015 un total de 8,616 pasivos ambientales de los cuales el 88% no ha sido posible identificar los responsables.

Según el decreto ley 28271, 2004 se define, un pasivo ambiental como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas a la fecha de vigencia de la ley, y que constituyen un riesgo permanente para la salud de la población, el ecosistema circundante y a la propiedad.

Una forma de contribuir a evitar estos pasivos ambientales es planificando un adecuado Balance de aguas en la operación minera, que complemente el proceso de cierre de minas evitando generar pasivos ambientales.

2 Objetivo

El objetivo del presente estudio es brindar lineamientos básicos a través de una metodología propuesta para realizar un adecuado balance de aguas dentro de una operación minera a tajo abierto.

3 Metodología para obtener un balance de aguas en minas de tajo abierto.

I Etapa: Identificación de componentes y condiciones climáticas

Identificación de los componentes dentro del sistema de extracción minera, que aportan, transportan y almacenan agua a lo largo del proceso, así como las condiciones climatológicas que participan en el Modelo.

II Etapa: Modelo de Balance de aguas

Desarrollo y calibración del modelo de balance de aguas para una operación minera usando el software GoldSim.

3.1 Identificación de Componentes

Siguiendo el principio de monitoreo de aguas de cualquier operación minera en el mundo, se define “Sistema de aguas arriba”, al conjunto de instalaciones que generan agua dentro de la Operación, conformado por las Pilas de lixiviación, tajos, depósitos de desmonte; y define como “Sistema aguas abajo”, al conjunto de instalaciones que tratan y descargan agua al medio ambiente, tales como las plantas de tratamiento de aguas acida, plantas para exceso de aguas, puntos de descarga al medio ambiente y puntos de control de agua.

Estas instalaciones se ingresan al modelo de Balance de aguas, tratando de generar todas las relaciones que se dan en la realidad, así como las condiciones climáticas que rigen el distrito minero, estas se pueden simular por cualquier método hidrológico que se conoce, pero lo que se recomienda es usar métodos estocásticos (Schlumberger, 2016).

3.1.1 “Sistema aguas arriba”.

El sistema de aguas arriba considera a las siguientes instalaciones dentro de las operaciones a tajo abierto:

- Pilas de lixiviación: La pila o PAD de lixiviación es una estructura a manera de pirámide escalonada donde se acumula el mineral extraído. A este material se le aplica, a través de un sistema de goteo, una solución cianurada de 50 miligramos por litro de agua, la cual disuelve el oro. Mediante un sistema de tuberías colocadas en la base del PAD, la solución disuelta de oro y cianuro – llamada solución rica - pasa a una poza de lixiviación o procesos, desde donde se bombea hacia la planta de procesos. (Gestión del Agua en Yanacocha, 2013).

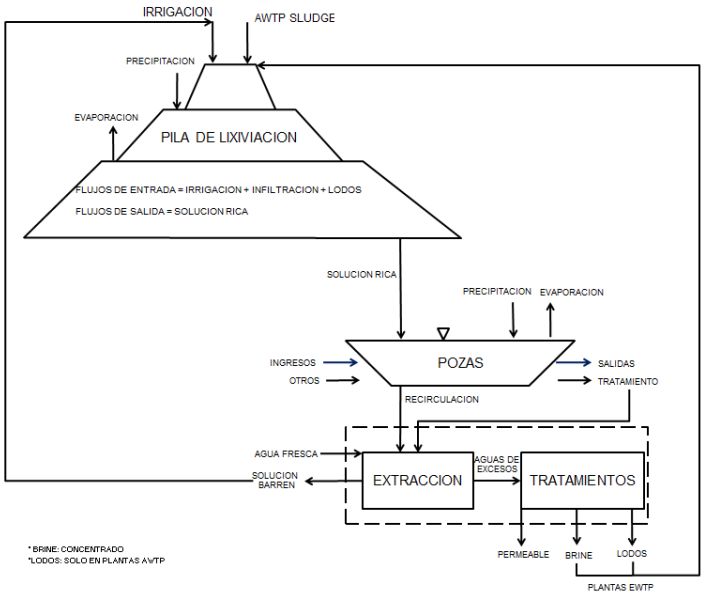
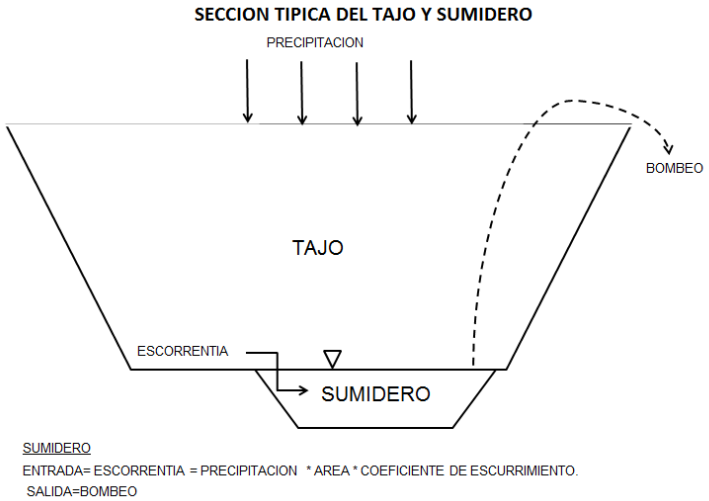


figura 3.1. Flujos de agua en la pila de lixiviacion. Fuente: Area de Hidrogeologia de Minera Yanacocha.

- Tajos: Una mina a tajo abierto es una excavación superficial, cuyo objetivo es la extracción de mineral, (Calder, 2000). Estos tajos se pueden dar en roca como en suelos, son las zonas donde se concentran las actividades de perforación, voladura y carguío del material, tanto mineral como material estéril.



-

Figura 3.2. Flujos de agua del tajo de mina. Fuente: Área de Hidrogeología de Minera Yanacocha.

- Depósitos de desmonte: en la operación minera, el material que es de desecho o material estéril, que no contiene mineral económicamente rentable, se tiene que depositar en lo que se conoce como depósito de desmonte. Estos depósitos se construyen siguiendo ciertos parámetros y normas de diseño. (faculty/min/rajesh-rai).

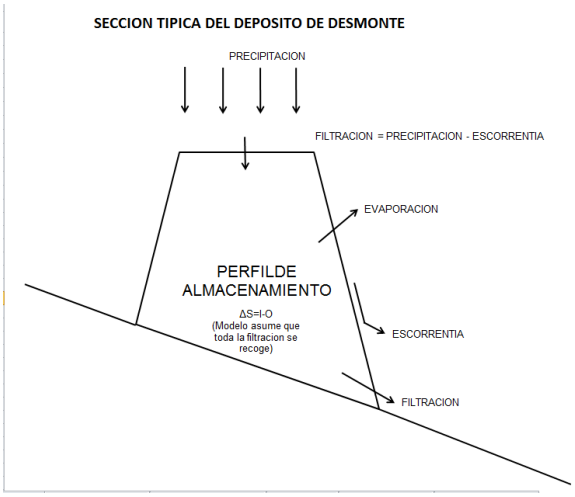


Figura 3.3. Muestra los flujos que se manejan en el depósito de desmonte. Fuente: Área de Hidrogeología de Minera Yanacocha.

El cálculo del flujo generado por cada instalación, se puede observar en los diagramas Fig. 3.1 - 3.3, donde básicamente dependen del área cubierta por la instalación en análisis, condiciones climáticas y reglas operacionales vigentes.

Los flujos de los tres sistemas aguas arriba, descritos anteriormente se pueden clasificar como “aguas de contacto”, debido a que el agua de lluvia al entrar en contacto con el material que está presente en las paredes y superficies de los tajos, se vuelve acida por el contenido mineralógico de los materiales, en especial con presencia de pirita.

Por ende estos flujos requerirán de un tratamiento previo antes de su descarga al medio ambiente, a través de los puntos de descarga. Es así que el modelo del Balance de agua, calcula los flujos que generan estas facilidades los cuales son llevados a las plantas de tratamiento, antes de su descarga al medio ambiente.

3.1.2 “Sistema aguas abajo”

El sistema de aguas abajo del modelo de balance ha sido construido para representar el almacenamiento, transporte y descarga del efluente tratado en las plantas de tratamiento de agua acida y de excesos.

Plantas de tratamiento de Exceso de aguas

Las aguas de exceso se originan en la temporada de lluvias cae en grandes cantidades sobre la zona de operaciones, ingresando a las pilas de lixiviación y a las pozas de procesos, generando un excedente de agua en el sistema

que es necesario liberar ya que afecta el proceso de producción y puede poner en riesgo su capacidad de contención. Ante esto, se implementa el tratamiento de aguas de exceso incorporando un nuevo sistema con tecnología de punta denominado Tratamiento de Aguas por Ósmosis Inversa. El agua de exceso, empujada por la alta presión de un sistema de bombeo, se hace pasar por unas membranas especiales muy finas, las que, sin el uso de reactivos químicos y con una alta eficiencia, retienen el contenido de metales y otras sustancias, dejando pasar el agua ya libre de elementos perjudiciales para el medio ambiente. (Gestión del Agua en Yanacocha, 2013).

Plantas de tratamiento de aguas acidas

En el tratamiento de aguas ácidas (presentes en forma natural en las aguas subterráneas y superficiales de las zonas de Jalca), se utilizan reactivos tales como la cal, que permite neutralizarlas y tratarlas adecuadamente. Esto tiene que ver con el pH, que es una unidad de medida de la acidez de los líquidos. La legislación ambiental vigente establece que el pH adecuado para cualquier uso debe estar entre 6 y 9 unidades; valores menores a este rango son considerados aguas ácidas y valores mayores a este rango son considerados alcalinos. Al neutralizar el agua por efecto de los reactivos, el pH llega a fluctuar dentro del rango indicado y, con la ayuda de sustancias floculantes y coagulantes, se separan los metales y demás partículas que afectan la calidad del agua. Así el líquido es devuelto al medio ambiente en las condiciones adecuadas. (Gestión del Agua en Yanacocha, 2013).

El sistema de aguas abajo; incluye una serie de pozas de almacenamiento y zonas de mezcla de los diferentes efluentes de las plantas de tratamiento de aguas acidas como de excesos. Acá también se consideran los puntos de descarga autorizados por el gobierno en cada una de las cuencas en las cuales se emplaza el proyecto minero.

3.1.3 Datos climáticos de entrada al modelo de balance de agua

Otro de los inputs al modelo está compuesto por los parámetros climatológicos que rodean a la operación minera y que están dados por la precipitación y evaporación.

- **Precipitación.**

Se denomina precipitación, a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.) y sólida (nieve, granizo, etc.) y que son provocadas por un cambio de la temperatura o de presión. (Ordoñez, 2012). La precipitación constituye la única entrada principal al sistema hidrológico continental (Musy, 2001).

En el sector de la operación minera, generalmente se cuenta con estaciones meteorológicas locales que registran datos de precipitación y evaporación. Estas mediciones en las estaciones nos van a permitir construir las series sintéticas de precipitaciones tanto para los periodos secos como lluviosos.

En la teoría de la probabilidad, se conoce como cadena de Márkov o modelo de Márkov a un tipo especial de proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento depende solamente del evento inmediatamente anterior. Esta característica de falta de memoria recibe el nombre de propiedad de Márkov. (Basharin, 2004).

Si consideramos el tiempo atmosférico de una región a través de distintos días, es plausible asumir que el estado actual sólo depende del último estado

y no de toda la historia en sí, de modo que se pueden usar cadenas de Márkov para formular modelos climatológicos básicos. (Basharin, 2004).

En base a la teoría de Márkov. Se desarrollan modelos de recurrencia de lluvias para una cantidad de datos de estaciones meteorológicas.

- **Evaporación**

La evaporación es el fenómeno físico que permite a un fluido, convertirse en vapor o sea, en gas e incorporarse al aire. Es un fenómeno no conocido exhaustivamente y forma parte del ciclo hidrológico. (Ordoñez, 2012).

Todas las facilidades que forman parte en la operación minera, las pozas de almacenamiento que se tienen en la operación y las pozas de procesos que contienen volúmenes de agua almacenada están sujetas a una cierta pérdida por evaporación. Para poder calcular estas pérdidas por evaporación también se pueden basar en las cadenas de Márkov, ya que se tienen datos de evaporación por estación de manera empírica y se necesita construir modelos sintéticos de tal manera que se tengan valores diarios para poder evaluar los modelos tanto en épocas secas como de lluvias.

De la misma manera que se hizo para la precipitación el análisis estadístico fue realizado a nivel diario con el propósito de ser consistente con la generación estocástica de precipitaciones, sin embargo tanto la distribución de frecuencia como de parámetros, varían mes a mes para representar la estacionalidad del fenómeno de evaporación a lo largo del año.

3.2 Modelo de Balance de Agua

3.2.1 Conceptualización del Balance de agua

Teóricamente La ecuación del balance de agua es una expresión muy simple, aunque la cuantificación de sus términos es normalmente complicada por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (en acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en la cuenca (Llorens, 2003).

Las precipitaciones que caen sobre las superficie terrestre vuelven a la atmosfera mediante la evaporación y otra parte discurre sobre la superficie terrestre, este escurrimiento, va sobre un red de drenaje desde las partes más altas de la cuenca hasta formar los ríos que llegan al mar, hay una parte que se infiltra lo que constituye las aguas subterráneas que forman acuíferos en algunos casos.

Estas magnitudes deben cumplir con la siguiente ecuación que se conoce con el nombre de Balance Hidrológico:

$$P = EV + ES + I \quad (1)$$

Del Balance Hidrológico, podemos conocer el estado de humedad de la cuenca, la cual está asociada al aporte de precipitación recibida y descontando las pérdidas generadas, estamos en la condición de clasificar el tipo de año (húmedo, normal o seco).

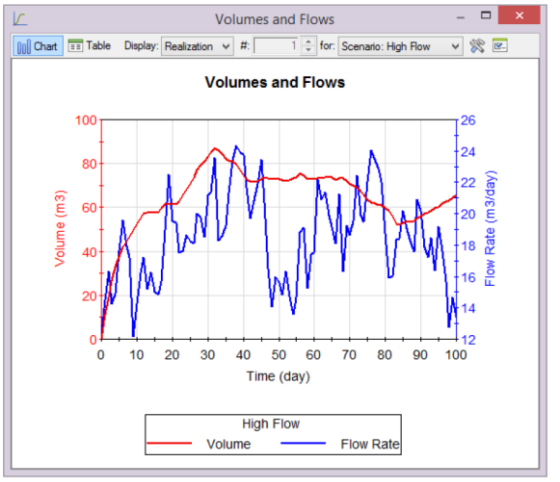
Esto permitirá planificar el recurso hídrico, en base a las demandas. (Ordoñez, 2012).

Basado en lo descrito anteriormente, el modelo de balance de agua para una mina a tajo abierto considerara que todas las instalaciones que generan, conducen,

almacenan, tratan y descargan aguas van a interaccionar entre sí mediante el sistema superficial o subterráneo de aguas en la Mina.

El modelo de balance de aguas se construye usando el software GoldSim de simulación dinámica probabilística (GoldSim Technology Group LLC), Este software permite crear modelos realistas que permiten la planificación y permite optimizar cada uno de los componentes del balance de aguas dentro de una operación minera. El software combina la flexibilidad de un marco de simulación probabilística de uso general y altamente gráfico con módulos especializados para soportar modelos de transporte masivo, todos los enfoques de simulación combina la dinámica del sistema con algunos eventos discretos, dentro de un marco de simulación Montecarlo.(www.goldsim.com).

Por todas estas características descritas, se considera que GoldSim es un software que se puede utilizar para el balance de agua de una mina a tajo abierto, por lo flexible del software que nos permite manejar todos los elementos de forma integrada, relacionándolos entre si y brindándonos resultados en cualquier punto del sistema en cualquier tiempo, como por ejemplo lo que se muestran en la figura 3.2.1



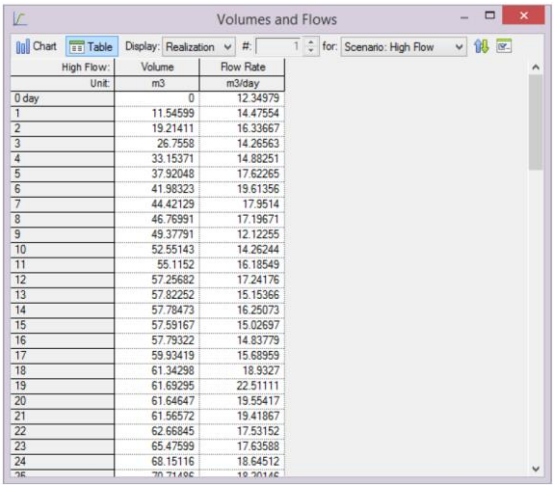


Figura 3.2.1. Muestra de los resultados en el GoldSim, Fuente: GoldSim 11.1 Summary. Summary of Major New Features and Changes May 2014

Estos reportes en formato de tablas o gráficos, nos permiten analizar de forma rápida cada simulación. En GoldSim, las visualizaciones se pueden mostrar tanto para un escenario, así como para múltiples escenarios, y a su vez para una salida específica

del sistema o para múltiples salidas si el sistema lo tuviese. (GoldSim 11.1 Summary, 2014).

3.2.2 Construcción del modelo de balance de agua

El modelo se estructura dentro del GoldSim usando compartimentos (cajas) para los sistemas de aguas arriba y aguas debajo de la mina, para los datos climáticos y para todas las relaciones que se dan entre componentes, más detalle se describe a continuación.

El enfoque de construcción del modelo GoldSim comprende la siguiente secuencia general:

- Caja de “Datos_Climáticos”: que se divide en 2:
  - Por un lado se deberán ingresar los datos de precipitación y evaporación de cada una de las estaciones meteorológicas que se encuentran alrededor de la mina.
  - Por otro lado se deben ingresar las ecuaciones u algoritmos para generar las series estocásticas de datos de precipitación y evaporación para escenarios futuros.
- Caja de “Aguas Arriba”: donde se crean todas las condiciones de los tajos y depósitos de desmonte de la operación minera, esta caja incluye el balance de agua local para cada facilidad, lo que genera el cálculo de escorrentía y filtración para el caso de los depósitos de desmonte.
- Caja de “Balance de Procesos”: donde se crean todos los elementos y relaciones funcionales que representan el circuito del proceso de mineral, que incluye pilas de lixiviación, pozas de almacenamiento y reglas operacionales de funcionamiento. Las relaciones se deben construir de acuerdo a los planes de descarga de mina que se hace por etapas y con las condiciones climáticas que los afectan. Con esto esperamos obtener los flujos diarios a enviar desde el circuito de procesos a las plantas de tratamiento de excesos.
- Caja de “Aguas abajo”: se pueden crear 2 cajas una para la planta de tratamiento de aguas acidas y otra para el tratamiento de las aguas exceso. Se crean todos los elementos y relaciones lógicas. Se debe representar las relaciones que existen entre ambas cajas y con el resto del sistema. Se deberá calcular los flujos finales a ser almacenados y/o descargados al medio ambiente.
- Caja de “Distribución” donde se crean todas las interrelaciones lógicas de distribución de las aguas de contacto entre plantas.
- Caja de “Descargas” deben relacionar todas las pozas de almacenamiento y descarga de aguas tratadas, con los puntos de descarga.

De acuerdo a este proceso de construcción, el primer nivel del modelo GoldSim, que comprende la estructura de módulos principales, se muestra en la Figura 3.4.

Dentro del proceso de construcción de los módulos, se incorporan de manera explícita las características geométricas de cada instalación, y esto se logra mediante algoritmos o relaciones lógicas que determinan la respuesta hidrológica de cada instalación frente a las condiciones de precipitación y evaporación.

De esta forma, el modelo completo incorpora después del primer nivel, otros subniveles los cuales interaccionan entre sí de forma dinámica, de acuerdo con el patrón climático imperante y con las reglas operacionales consideradas.

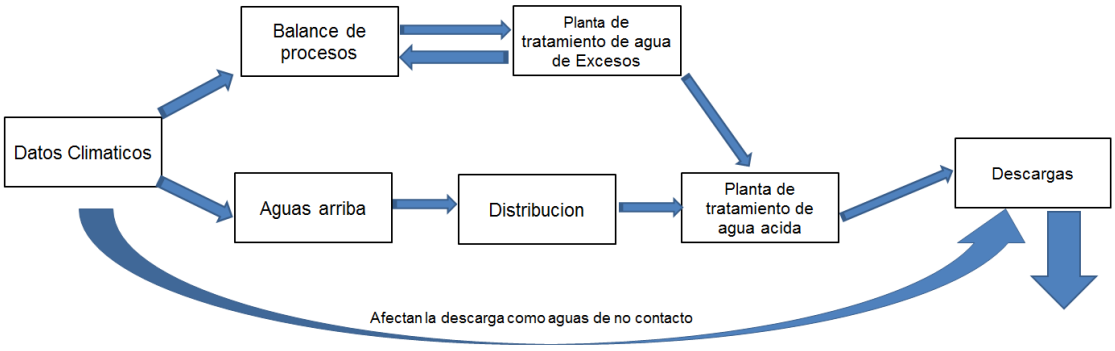


Figura 3.4. Esquema de módulos principales del modelo en GoldSim Fuente: Propia.

3.2.3 Calibración del modelo de balance de agua

El procedimiento de calibración corresponde simplemente a comparar los flujos simulados por el modelo con aquellos medidos por la red de monitoreo. De forma iterativa, a través del método de “prueba y error”, se ajustan los parámetros de los modelos hidrológicos que caracterizan a cada una de las instalaciones.

La calibración obtenida genera la confianza necesaria para concluir que los algoritmos desarrollados en el modelo son los adecuados para pronosticar de manera efectiva la dinámica del balance de aguas tanto para el sistema de agua de contacto como para el sistema de agua de exceso del circuito de proceso. Así el modelo de balance de agua, operado de forma estocástica, será una herramienta predictiva válida para los escenarios futuros. (Schlumberger, 2016).

4 Conclusiones.

- El adecuado balance de agua en los proyectos mineros permite manejar con mayor precisión las cantidades de agua que usa la operación y la calidad en la descarga al medio ambiente del recurso hídrico.
- Las plantas de aguas de exceso son necesarias para tratar las aguas que vienen de los procesos con contenido de metales y posteriormente sean derivadas a las plantas de tratamiento de aguas acidas o en su defecto regresar al sistema del circuito cerrado de la mina para ser reutilizadas.
- Es necesario que en las diferentes etapas del diseño del proyecto minero se pueda considerar el balance de aguas teniendo en cuenta eventos máximos de lluvias para determinar la capacidad de pozas necesarias para soportar eventos superiores al promedio histórico, como por ejemplo el fenómeno del niño.
- Los tajos, depósitos y pilas de lixiviación en minería se van construyendo de acuerdo a un plan de minado, esto hace que el área para la generación de aguas se incremente en el tiempo, lo cual deberá ser tomado en cuenta para la construcción del modelo de balance de aguas.

- Ante la ocurrencia de escenarios climáticos húmedos, es necesario almacenar temporalmente un volumen importante de aguas de contacto en el circuito de pozas de aguas de contacto.
- Si existiese riesgo de sobrepasar la capacidad de las pozas, es posible reducir temporalmente el flujo de desagüe del tajo (medida de mitigación), considerando que esto podría impactar en el plan de minado ya que el nivel freático del tajo no permitirá operar la mina, por lo que se tiene que manejar siempre al menos dos frentes de operación.
- Los reservorios de almacenamiento de agua tratada en la operación son importantes porque permiten regular la cantidad de agua sobre todo en periodos secos, para garantizar los compromisos que se tienen de descarga hacia las comunidades vecinas.
- Las descargas de control son muy importantes en las cuencas que poseen un área de contribución pequeña, adyacentes a la operación minera, porque permiten mantener un flujo mínimo en el curso del agua, especialmente durante la temporada seca y para condiciones secas.
- Los Puntos de Control combinan el flujo de las cuencas no disturbadas o flujo natural con los flujos descargados de la operación previo tratamiento. A estos últimos se les ha denominado flujos totales. Estos flujos también se simulan dentro del modelo del balance de agua.

Finalmente se espera que este artículo contribuya en el proceso de elaboración de un modelo de balance de aguas integrado al diseño del proyecto minero de Tajo abierto, evitando incrementar el número de pasivos ambientales.

Referencias Bibliográficas

Basharin, Gely P.; Langville, Amy N.; Naumov, Valeriy A. (2004). «The Life and Work of A. A. Markov». Linear Algebra and its Applications (en inglés) 386: 3-26. Consultado el 31 de marzo de 2010.

Estudio Hidrológico y Balance de Agua para la V Modificación del EIA SYE Estudio de Balance de Agua. 15 de julio de 2016. Schlumberger.

Facultad de minería rajesh-rai/NMEICT-Slope http://www.iitbhu.ac.in/faculty/min/rajesh-rai/NMEICT-slope/Pdf/12%20Mine%20Waste%20dumps%20and%20tailing%20dams.pdf

Gestión del Agua en Yanacocha, 2013, http://www.yanacocha.com/wp-content/uploads/2013/11/GESTI%C3%93N-DEL-AGUA-FINAL.pdf

GoldSim 11.1 Summary. Summary of Major New Features and Changes May 2014. http://www.goldsim.com/Web/Solutions/EnvironmentalSystems/MineWaterWaste/

Inversión minera creció 142% en últimos cuatro años y suma US$ 34,020 millones (2015, Agosto 2). Diario Gestión. Obtenido de http://gestion.pe/economia/inversion-minera-peru-crecio-142-ultimos-cuatro-anos-y-suma-us-34020-millones-2138759

Juan Julio Ordoñez Galvez, SENAHMI, Cartila técnica balance hídrico superficial, Editado por: Sociedad Geográfica de Lima. Foro Peruano para el Agua—GWP Perú

Peter N. Calder (2000). Tópicos de Ingeniería de Minas a Rajo Abierto, Centro de Minería Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.