

BALANCE HIDROLÓGICO PARA EL LLENADO DE LOS TAJOS NORTE Y SUR. TRANSFORMACIÓN LLUVIA – ESCORRENTÍA A NIVEL DIARIO PARA LAS CUENCAS QUE DRENAN A LOS TAJOS, MODELO GR4J Y MODELO HEC-HMS.

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz¹ Andrés Humberto Otálora Carmona², Ricardo Aguilar Piña³

¹ Profesor Titular - ² Profesor Instructor - ³ Profesor Asistente
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.

E-mail: alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co, andres.otalora@escuelaing.edu.co, william.aguilar@escuelaing.edu.co

Introducción

Este artículo presenta un modelo conceptual, los cálculos y los resultados para diferentes escenarios de llenado de un tajo de desarrollo minero a cielo abierto, modelo utilizado particularmente en el Proyecto minero La Loma, localizado en el departamento del Cesar y que actualmente explota la empresa Drummond Ltd. El objetivo del llenado de este tajo es restablecer el estado natural de la zona para mitigar los efectos a la biósfera. Para realizar dicho llenado fue necesario la evaluación del balance hidrológico a nivel diario en las cuencas que tributan al tajo en su zona norte y sur. La estimación de los caudales de escorrentía a nivel diario se realizó utilizando los modelos de lluvia escorrentía GR4J, metodología desarrollada en Francia y el modelo integrado del software Hec-Hms de tanques sucesivos.

Los límites topográficos de las áreas aportantes al sistema se han definido a partir del estado antrópico de la zona, establecido de acuerdo con las actividades propias de la explotación. En general estas áreas de drenaje corresponden a zonas de disposición de material extraído, disposición que define el drenaje superficial y el manejo de la escorrentía.

Definido el modelo conceptual para realizar las correspondientes modelaciones de llenado del Tajo, se definieron tres escenarios básicos para analizar las características espaciales y temporales del llenado de acuerdo con las diferentes variables hidrológicas involucradas en la operación.

Recopilación de información hidroclimatológica

Para disponer de la información hidroclimatológica de la zona de estudio, se procedió a revisar y adquirir, para la zona de estudio, los datos de estaciones climatológicas especiales, ordinarias, pluviométrica y pluviográficas del Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Se seleccionaron todas aquellas estaciones con años de registro suficientemente extensos. En total se obtuvieron 27 estaciones con datos de temperatura, precipitación y evaporación a nivel diario, para todo el periodo de registro seleccionado.

Escenarios de modelación del llenado

Tal como se mencionó anteriormente, con el objetivo de evaluar las características temporales del llenado se analizaron tres escenarios, que responden a las condiciones propias de la zona y a los posibles requerimientos de operación del sistema. A continuación, se describen los tres escenarios de modelación:

Escenario 1: Llenado del tajo norte con la escorrentía directa diaria de las áreas aferentes

Se realiza el llenado de la zona norte del tajo a nivel diario, teniendo en cuenta la precipitación directa en dicho tajo más la escorrentía superficial proveniente del área denominada “Escombrera Fa”, cuenca que actualmente drena naturalmente.

Para la estimación de la escorrentía se utilizarán los registros de precipitación de estaciones representativas de la zona e información de la evapotranspiración. La evapotranspiración se

determinó a partir de los registros históricos de temperatura y de modelos simplificados de evapotranspiración potencial. Los caudales diarios de escorrentía superficial se evaluaron a partir del modelo de lluvia – escorrentía, GR4J, metodología que tiene en cuenta, a partir de un modelo de tanques, la información diaria de precipitación y evapotranspiración en el sistema. Adicionalmente se realizó un modelo integrado a partir del software HEC-HMS, el cual permite determinar la escorrentía superficial y realizar el balance a partir de la metodología de tanques sucesivos que integra dicho software.

Escenario 2: Llenado del tajo norte con la escorrentía directa diaria de las áreas aferentes más la escorrentía captada de la “escombrera Aa”

Se realiza el llenado de la zona norte del tajo a nivel diario teniendo en cuenta la precipitación directa en la superficie del tajo, la escorrentía superficial proveniente del área denominada “Escombrera Fa” y una posible entrada adicional del caudal de escorrentía proveniente de la “escombrera Aa”, la cual se encuentra al norte de dicho tajo, considerando que resulta sencillo dirigir esta escorrentía a la zona norte del tajo. Para la estimación de la escorrentía se utilizará la misma metodología definida en el escenario 1.

Escenario 3: llenado del tajo sur con la escorrentía directa diaria de áreas aportantes al tajo sur y los excesos del tajo norte

Una vez realizado el llenado de la zona norte del tajo a la cota establecida por Drummond Ltd, se debe realizar el llenado a nivel diario de la zona sur. Para este escenario, se tuvo en cuenta, adicionalmente a los vertimientos de la zona norte, la precipitación directa y la escorrentía superficial proveniente de las áreas que drenan a esta zona sur. Para la estimación de la escorrentía directa de las áreas aportantes a la zona sur, se realizará el mismo procedimiento descrito en el escenario 1.

En la figura 1 se encuentra un esquema general del área de explotación de explotación y las áreas que drenan al tajo en su zona norte y sur.

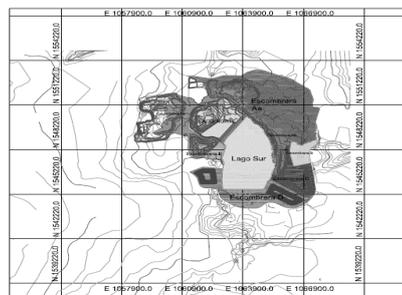


Figura 1.- Áreas de drenaje aferentes a los Tajos Norte y Sur, Cuenca Plan Minero

Llenado del Tajo. Modelo de balance hidrológico diario

Para la determinación del balance hidrológico en un área dada, es necesario definir todas las entradas y salidas para el volumen de control establecido. Utilizando la ecuación fundamental de la hidrología a nivel diario, de acuerdo con las particularidades de

la zona y del sistema a modelar, se definió el balance en el volumen de control, de la siguiente manera:

$$I - O = \frac{dV}{dt} \quad [1]$$

Donde,

- I Todas las entradas de agua a nivel diario al volumen de control [m³]
 O Todas las salidas de agua a nivel diario al volumen de control [m³]
 dV/dt Cambio de almacenamiento en el volumen de control [m³/día]

Teniendo en cuenta la hidrología propia de la zona y las condiciones particulares del proyecto se han definido las entradas y salidas en el volumen de control así:

$$I = P_{Lago_Norte} + q_e + q_{sub} \quad [2]$$

$$O = EVP_{Lago_Norte} \quad [3]$$

Donde,

- P_{Lago_Norte} Precipitación directa diaria en el Tajo [m³]
 q_e Escorrentía directa proveniente de cuencas aferentes al Tajo [m³]
 q_{sub} Aportes subterráneos que consideran infiltración y flujos sub-superficiales. [m³]
 EVP_{Lago_Norte} Evapotranspiración directa diaria al Tajo [m³].

En la figura 2 se presente un resumen esquemático de las variables utilizadas para realizar el estudio en la zona de proyecto.

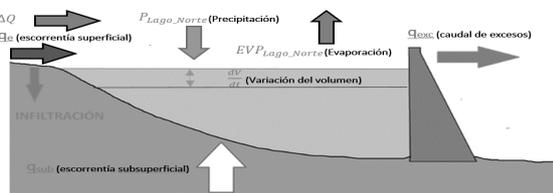


Figura 2.- Esquema general del balance hidrológico en el tajo. Análisis de llenado a nivel diario

Modelos lluvias escorrentía. Método GR4J y modelo HEC-HMS

El modelo GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de 4 parámetros y resolución diaria (Perrin et al, 2003) y es una alternativa a los modelos tradicionales de largo plazo. Es un modelo basado en la representación de la retención del suelo a partir de dos tanques y dos hidrogramas unitarios. Las variables utilizadas para la estimación de la escorrentía son: x1, capacidad máxima del tanque de producción [mm], x2, coeficiente de intercambio de aguas subterráneas [mm] x3, capacidad máxima para el tránsito en canales [mm] x4 y el tiempo base del hidrograma unitario UH1 [días]. Dichos parámetros fueron calibrados para la zona de estudio.

En la ilustración 3 se muestra los resultados obtenidos para un área en particular a partir del modelo GR4J. Esta metodología se basa en la estimación de la escorrentía superficial diaria a partir de datos diarios de precipitación y evapotranspiración.

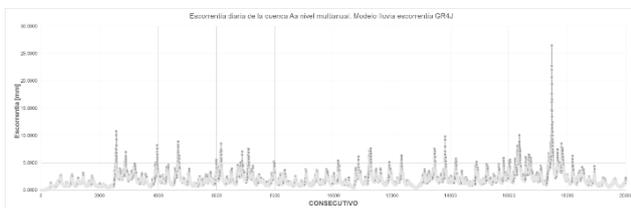


Figura 3.- Escorrentía diaria de la cuenca Aa nivel multianual. Modelo lluvia escorrentía GR4J.

La segunda metodología utilizada para la modelación de la escorrentía a nivel diario es el modelo integrado de HEC-HMS, metodología que se basa en el análisis de cinco tanques sucesivos, los cuales representan distintos niveles de retención de la precipitación. Los dos primeros tanques representan la retención superficial y los tres tanques restantes, representan la condición de infiltración, percolación y nivel freático en el suelo.



Figura 4.- Esquema general de la modelación del llenado del tajo a nivel diario en HEC-HMS.

Con base en las dos metodologías descritas anteriormente y teniendo en cuentas las diferentes variables hidrológicas se realizó el balance para las áreas de llenado correspondientes a la zona norte y sur del tajo. Se determinó a nivel diario, la variación del volumen almacenado y la elevación del nivel. En la figura 5 se presenta un ejemplo del comportamiento del llenado a nivel diario de la zona norte del tajo.

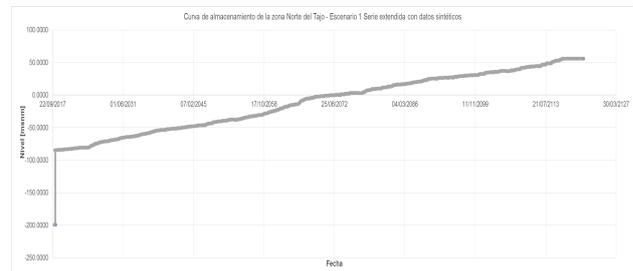


Figura 5.- Curva de almacenamiento de la zona norte del tajo - Escenario 1 - Registros Histórico extendidos con los datos sintéticos

Conclusiones y recomendaciones

Al comparar los resultados de los escenarios 1 y 2 se observa que existen variaciones importantes en los tiempos de llenado de la zona norte del tajo, debido a la variación de las áreas de drenaje consideradas en cada caso. Considerar una superficie mayor reduce de manera importante los tiempos de llenado.

Debido a las características de la modelación de las variables hidrológicas y los tiempos de llenado, es necesario realizar análisis de sensibilidad de los resultados, teniendo en cuenta por ejemplo los efectos que implica el cambio climático.

Para estas primeras modelaciones de los escenarios de llenado no se tuvo en cuenta de la escorrentía sub-superficial proveniente del nivel freático que drena al tajo. En estudios posteriores se pretende analizar el comportamiento del nivel diario del tajo, teniendo en cuenta el flujo subterráneo, el cual puede llegar hacer una variable importante en esta zona del país.

Referencias bibliográficas

- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2018). "Caracterización del área de influencia (componente hidrología e hidráulica) requerida para la modificación de la licencia ambiental del proyecto la loma para el periodo 2019-2048". Centro de Estudios Hidráulicos. Bogotá, Colombia.
- Carvajal Fernando y Ernesto Roldán. (2007). "Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del río Aburrá". Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.