

Implementation of a hydrological model to optimize the operation of Baba Hydroelectric Power Plant

Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba

J.M. Campo¹ M. Boada²

¹Especialista hidrólogo CELEC EP Hidronación.

E-mail: jose.campo@celec.gob.ec

²Jefe de Central, Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP Hidronación

E-mail: mauricio.boada@celec.gob.ec

Abstract

In order to improve the regulation of the reservoir associated with the Baba Hydroelectric Power Plant and optimize the use of the resource for energy production, a hydrological model was developed and was incorporated for the first time as an input for decision making regarding its management.

This paper motivates the choice of the TETIS model and proposes the development of a methodology for its implementation to obtain the forecast of flows in the basin contributing to the reservoir. The proposed methodology is reproducible in other water sheds of Ecuador because it's been developed based on topographic data, land uses and soil types available at national level.

Motivated by the purpose of the model to optimizing energy production in the Baba plant, it has been developed with an 1 hour time scale, considering the origin data and keeping reasonable computing times, the spatial scale chosen is 200 meters cell size. With an efficiency coefficient for calibration of 0.9014 and 0.5538 and 0.6692 for validation, the reliability of the model can be considered as good.

Another functionality of the model will be risk management downstream by avenue, anticipating the arrival of high flows and making possible an earlier alert through its incorporation in Early Warning Systems and Decision Support Systems.

Index terms— Distributed hydrological model, hydrological simulation, GIS, TETIS, prediction, forecast, reservoir, shedding, Ecuador.

Resumen

Con objeto de mejorar la regulación del embalse asociado a la Central Hidroeléctrica Baba y optimizar el aprovechamiento del recurso para la producción energética se desarrolló un modelo hidrológico que por primera vez se incorpora como insumo para la toma de decisiones en cuanto a su manejo.

Este documento motiva la elección del modelo TETIS y propone el desarrollo de una metodología para su implementación que permita obtener el pronóstico de caudales en la cuenca aportante al embalse de la Central Hidroeléctrica Baba. La metodología planteada es reproducible en otras cuencas del Ecuador al haberse desarrollado en función de datos topográficos y de usos y tipos de suelo disponibles a nivel nacional.

Motivado por el objeto del modelo de optimizar la producción energética en la central Baba se ha desarrollado con una escala temporal horaria, teniendo en cuenta los datos de origen y para mantener tiempos de computación razonables la escala espacial elegida ha sido de 200 metros de tamaño de celda. Con coeficiente de eficiencia para calibración de 0,9014 y para validación de 0,5538 y 0,6692 se puede considerar la fiabilidad del modelo como buena.

Otra funcionalidad del modelo será la gestión de riesgos aguas abajo por avenida, anticipando la llegada de altos caudales y haciendo posible una alerta más temprana mediante su incorporación en Sistemas de Alerta Temprana y Sistemas de Ayuda a la Decisión.

Palabras clave— Modelo hidrológico distribuido, simulación hidrológica, SIG, TETIS, predicción, pronóstico, embalse, vertimiento, Ecuador.

Recibido: 30-09-2018, Aprobado tras revisión: 16-01-2019

Forma sugerida de citación: Campo, J.; Boada, M. (2019). "Desarrollo de un modelo hidrológico distribuido para optimizar la operación de la Central Hidroeléctrica Baba". Revista Técnica "energía". No. 15, Issue II, Pp. 47-56

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

Con objeto de mejorar la regulación del embalse asociado a la Central Hidroeléctrica Baba y optimizar el aprovechamiento del recurso para la producción energética se desarrolló un modelo hidrológico que permita predecir los caudales de ingreso al embalse y que por primera vez se incorpora como insumo para la toma de decisiones en cuanto a su manejo. El modelo además debería servir para la gestión de riesgos aguas abajo por avenidas, anticipando la llegada de altos caudales y haciendo posible una alerta más temprana.

Durante la realización del estudio e implementación del modelo TETIS [1], se obtuvieron buenos índices de eficiencia, sin embargo, se identificaron eventos de precipitación con variaciones entre el tiempo pico del caudal predicho y el tiempo real de llegada de los máximos caudales, también se presentaron diferencias entre los caudales máximos modelados y reales. Estos errores son atribuibles principalmente a la poca densidad de la red meteorológica, a las grandes áreas que se encuentran sin monitorear y a la falta de información en zonas elevadas de la cuenca.

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta la formulación del problema. Las secciones III y IV contienen el desarrollo y descripción del modelo. En la sección V se presentan los resultados, para finalizar en la sección VI con las conclusiones y recomendaciones.

Se describe a detalle la metodología empleada en este modelo ya que los datos topográficos y de tipos y usos de suelo están disponibles para todo el territorio nacional, por lo que la presente metodología es reproducible en todas las cuencas de Ecuador.

2. PROBLEMÁTICA

La Central Baba es una central de pasada, con un embalse de regulación diaria, como se demuestra en la fórmula (1).

$$C_R = \frac{V_U}{Q_p} = \frac{9970000 \text{ m}^3}{105,92 \text{ m}^3/\text{s}} \tag{1}$$

C_R = Capacidad de Regulación.

V_U = Volumen Útil.

Q_p =Caudal promedio.

Por tanto y para usar todo el caudal de ingreso al embalse, este deberá ser descargado a través de las turbinas y/o del vertedero libre “pico de pato”. En el primer caso el agua se aprovecharía para generación en la Central mediante el trasvase al embalse Daule-Peripa y en el segundo caso seguiría su curso en el rio Quevedo

o la combinación de ambas.

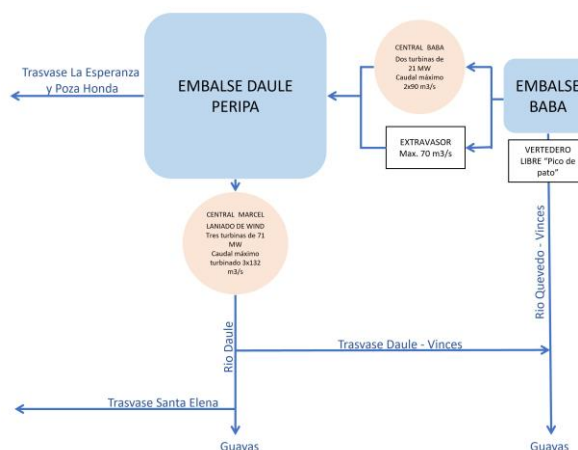


Figura 1. Esquema de embalses y trasvases en la cuenca del Guayas, elaboración propia

Durante estos casi cinco años de operación (Dic. 2013 – Sept. 2018), se ha podido constatar que hay una cantidad importante de agua que es vertida por el “Pico de pato”, porque no se cuenta con un método para el pronóstico de caudales de ingreso, y que a pesar de tener una Red Meteorológica que permite verificar la presencia de lluvias en la cuenca; esta acción es puntual e instantánea y no permite tomar acciones oportunas para disminuir al máximo el vertimiento.

Mediante la incorporación del presente modelo con buena capacidad para la predicción de caudales horarios hasta el tiempo de concentración de la cuenca, se dispone de información más precisa para tomar decisiones que resulten en una disminución del caudal vertido por el “Pico de pato”.

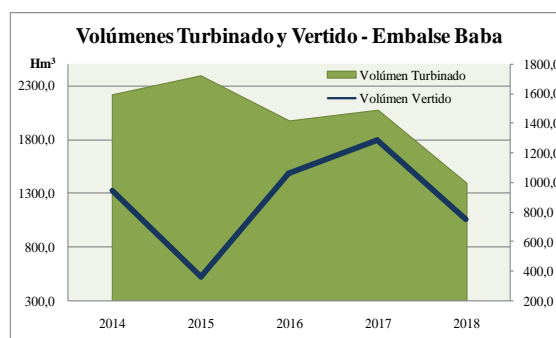


Figura 2. Volúmenes, Embalse Baba. Elaboración propia

Estimamos que únicamente con disminuir el vertimiento al 50%, la producción en la Central podría incrementarse en aproximadamente 20%, porcentaje que, al convertirse en ingreso de recursos económicos, resulta beneficioso para la Corporación.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca aportante al embalse Baba está localizada entre las provincias de Los Ríos, Pichincha y Cotopaxi,



variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

El modelo TETIS trabaja como una malla interconectada en tres dimensiones. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente aguas abajo siguiendo las direcciones de flujo proporcionadas por el Modelo Digital del Terreno (MDT), hasta llegar a la red de drenaje compuestas por cauces o cárcavas y cauces. La definición de cárcavas y cauces se realiza a través de áreas umbrales de aportación en determinada celda.

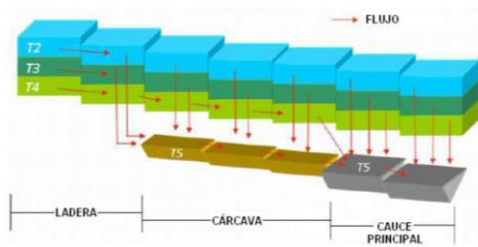


Figura 5. Movimiento y conexión entre celdas en el modelo TETIS, fuente DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9.0.1

Hacia las celdas normales ingresaría la escorrentía directa, cárcavas directa e interflujo y cauces directa, interflujo y flujo base.



Figura 6. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes del sistema. Fuente Montoya 2008.

El modelo TETIS [2] además cumple las exigencias para su integración dentro de sistemas de alerta temprana.

En la presente modelización no se han incluido los tanques de:

- Manto de nieve. Al no ser relevante para la presente simulación.
- Intercepción. Al no disponer de datos para el modelo de intercepción se ha decidido incluir esta dentro del tanque de almacenamiento estático en superficie.

4.4. Parámetros de entrada al modelo, caracterización de la cuenca

Para optimización del tiempo de ejecución de la

simulación manteniendo la variabilidad espacial de la información en función de las fuentes, se ha decidido como tamaño de celda óptimo para la realización del modelo 200 metros.

4.4.1 Información topográfica:

A partir del Modelo Digital del Terreno SRTM de la NASA, de 30 metros de tamaño de celda, se ha realizado la interpolación a un modelo de 200 metros de lado de celda.

A partir de este MDT 200 metros se han obtenido los mapas de pendientes, dirección de flujo y flujo acumulado.

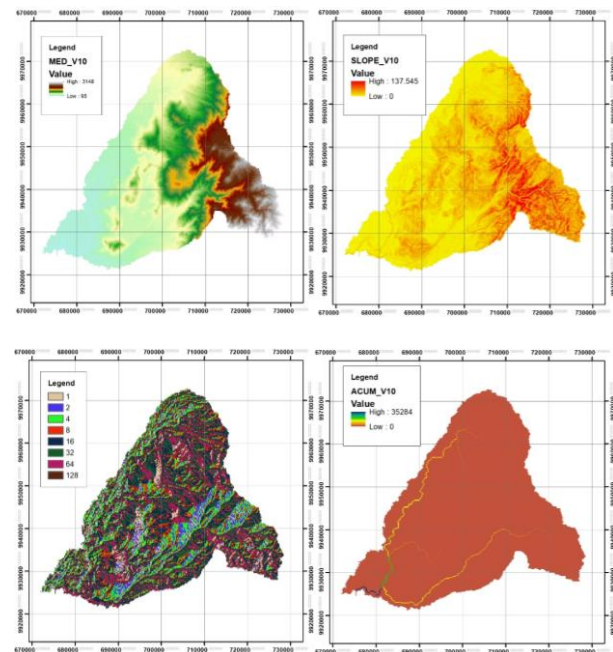


Figura 7. Datos topográficos cuenca.

4.4.2 Características del terreno:

Como se mencionó en el numeral 3, la Central Baba está ubicada en la Provincia de Los Ríos, en el centro occidente del Ecuador. Desde el punto de vista geológico, esta zona se encuentra mayormente conformada por rocas jóvenes, producto de recientes depósitos de edad cuaternaria.

Las rocas más antiguas se ubican en la parte Este a lo largo de toda la provincia, tomando la alineación de la tectónica regional en sentido noreste-suroeste. Estas rocas consisten en gran parte de rocas volcano-sedimentarias de origen marino que conforman la ribera Oeste de la Cordillera Occidental, entre las que se pueden citar, están: la Unidad Apagua, compuesta de lutitas y grauvacas, la Formación Macuchi, compuesta de lavas andesíticas, tobas y volcano-clastos, y la Formación Piñón, compuesta de lavas basálticas, tobas y brechas. Interrumpiendo ciertas formaciones rocosas

se encuentran los intrusivos de granodiorita, diorita y pórfido.

Capacidad de infiltración del suelo (Ks); Representa la permeabilidad superficial o conductividad hidráulica saturada del suelo. Dado en mm/h.

Tabla 1: Coef. Permeabilidad por tipo de suelo. Fuente [3].

| Tipo de suelo | Coef_Peameab_K |
|-----------------------|----------------|
| ARCILLO-ARENOSO | 0,9 |
| ARCILLO-LIMOSO | 0,25 |
| ARCILLOSO | 0,05 |
| FRANCO | 1,3 |
| FRANCO ARCILLO-LIMOSO | 0,8 |
| FRANCO-ARCILLOSO | 0,8 |
| FRANCO ARENOSO | 2,6 |
| FRANCO LIMOSO | 1 |
| LIMOSO | 0,9 |

En función del tipo de terreno obtenido de las capas de suelos del Geoportal Agroecuatoriano se han obtenido los siguientes resultados para Ks:

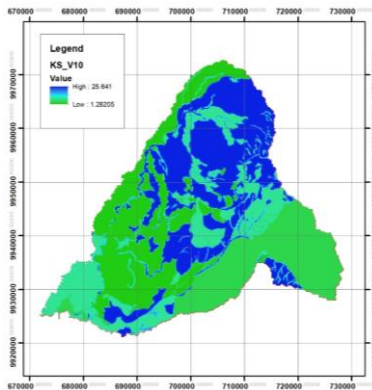


Figura 8. Conductividad hidráulica saturada del suelo (Ks), Elaboración propia.

Capacidad de percolación del sustrato (Kp); Representa la capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso. Dado en mm/h. A falta de información sobre los estratos profundos se estima como la mitad de Ks:

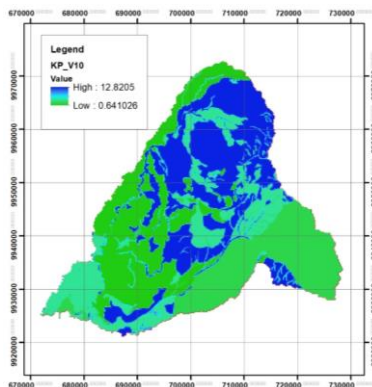


Figura 9. Capacidad de percolación del sustrato, elaboración propia.

Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo o Conductividad hidráulica para el interflujo en mm/h (KSS). A falta de datos se estiman en función de Ks: $K_{ss}=K_s$.

Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso o Conductividad hidráulica saturada del acuífero en mm/h (KSA). A falta de datos se estiman en función de Kp: $K_{sa}=K_p$.

Capacidad de percolación al acuífero profundo o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso, en mm/h (KPS). A falta de datos se estiman en función de Kp: $K_{ps}=0,1K_p$.

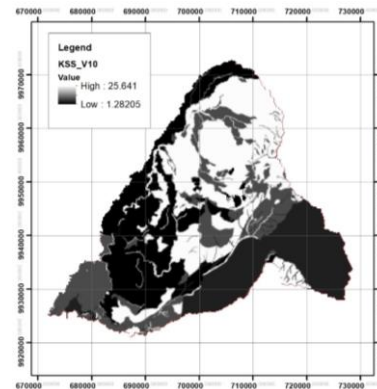


Figura 10. Conductividad hidráulica para el interflujo. Kss

Almacenamiento estático (Hu); Capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superficial de suelo incluye también las abstracciones iniciales, en milímetros.

No se introduce en el modelo capa de cobertura de vegetación por lo que se incluye el almacenamiento por intercepción dentro del almacenamiento estático.

A partir de la capa de uso y cobertura de tierra obtenida del Geoportal Agroecuatoriano se han establecido los siguientes valores de abstracciones iniciales en función del uso del suelo.

Tabla2: Valores asignados a las abstracciones iniciales por cobertura vegetal, [4]

| Cobertura | Almacenamiento Estático (mm) |
|---------------------------------|------------------------------|
| BOSQUES | 9 |
| AGROPECUARIAS | 2 |
| ANTROPICOS | 1 |
| VEGETACION ARBUSTIVA Y HERBACEA | 3 |
| CUERPOS DE AGUA | 0 |

Obteniendo los siguientes resultados:

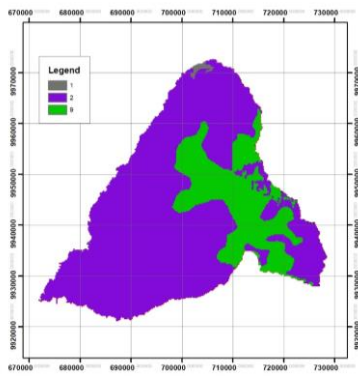


Figura 11. Almacenamiento estático por vegetación

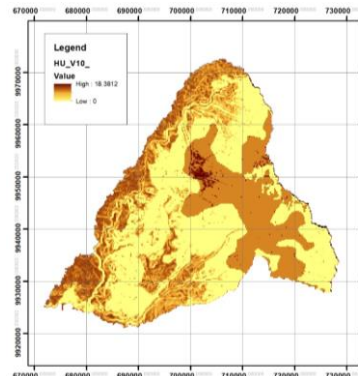


Figura 13. Almacenamiento estático en el suelo total, Hu, elaboración propia.

A partir de la capa de pendientes se ha obtenido las abstracciones iniciales en la superficie del suelo.

Tabla3: Almacenamiento en suelo a partir de datos de [5]

| Pendiente (S) | Almacenamiento en suelo (mm) |
|---------------|------------------------------|
| 0 | 10 |
| 1 | 8,7 |
| 2 | 7,4 |
| 3 | 6,1 |
| 4 | 4,8 |
| 5 | 3,5 |
| 6 | 2,2 |
| 7 | 0,9 |
| >8 | 0 |

Obteniendo los siguientes resultados:

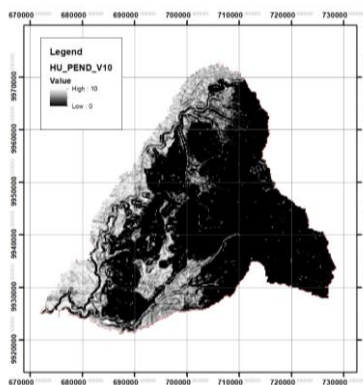


Figura 12. Almacenamiento estatico en el suelo, pendientes, elaboración propia.

A partir de estos datos se ha sumado la interceptación a partir de la cobertura vegetal a la resultante de la pendiente del terreno obteniendo el siguiente resultado:

4.4.3 Velocidad del agua en ladera:

A partir de las velocidades aproximadas de escorrentía de la Tabla 4, obteniendo los siguientes valores según tipo de cobertura de suelo:

Tabla4: Velocidad superficial del agua (m/s), fuente [6]

| Cobertura del terreno | | Pendiente en porcentaje | | | |
|-----------------------|-------|-------------------------|-------------|-------------|--------|
| Descripción | Valor | 0-3 | 4-7 | 8-11 | 12- |
| Bosque | 9 | 0-0,457 | 0,457-0,076 | 0,076-0,990 | 0,990- |
| Pastizal | 5 | 0-0,076 | 0,076-1,067 | 1,067-1,295 | 1,295- |
| Cultivo | 3 | 0-0,914 | 0,914-1,372 | 1,372-1,676 | 1,676- |
| Pavimento | 1 | 0-2,591 | 2,591-4,115 | 4,115-5,182 | 5,182- |

Se ha desarrollado la formula (2) para obtención de la velocidad en ladera en función de la pendiente y del tipo de cobertura.

$$v = 1.38 * \frac{m^{0.5556}}{c^{0.78125}} \quad (2)$$

Donde m es la pendiente en tanto por ciento y c es el tipo de cobertura según valores señalados en la tabla 4.

Obteniendo los siguientes resultados:

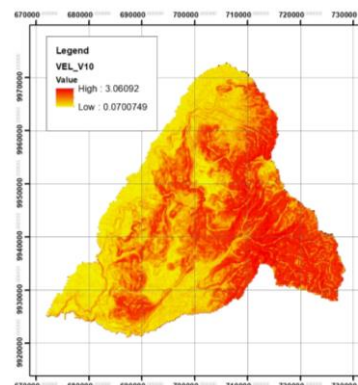


Figura 14. Velocidades en ladera, elaboración propia.

4.4.4 Propagación en cauce:

Tetis establece la forma de la sección característica en los cauces a partir de relaciones de geometría hidráulica propuestas por Leopold y Madock[7] El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos que intervienen en el cálculo del área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena, ancho de la sección transversal a sección llena, caudal a sección llena.

Dado que no hay información de regiones geomorfológicas homogéneas en la cuenca se utilizó las recomendadas por Vélez [8] y propuestos en TETIS para una sola región.

4.4.5 Información meteorológica:

A continuación, se describe la información meteorológica de entrada al modelo:

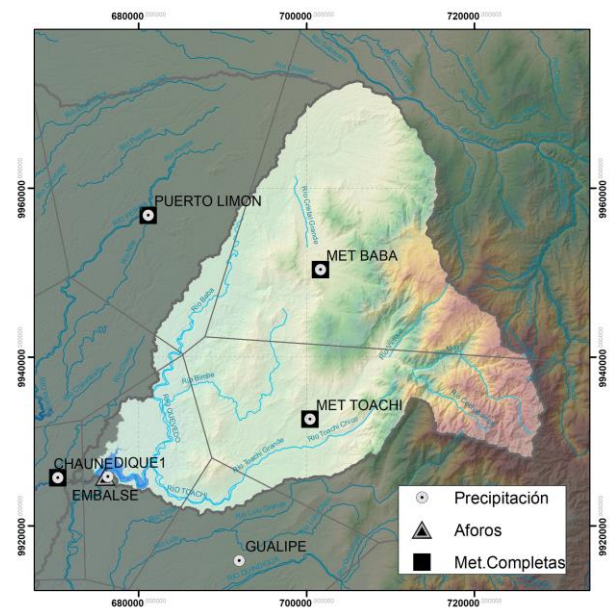


Figura 15. Estaciones meteorológicas e hidrológicas cercanas a la cuenca, elaboración propia.

Tabla 5: Coordenadas Estaciones CELEC Hidronación

| Nombre | Tipo | utm x | utm y | Cota (m.s.n.m.) |
|----------|-----------------------|--------|---------|-----------------|
| PtoLimon | MeteorológicaCompleta | 681141 | 9956802 | 242 |
| Dique1 | Precipitación | 676325 | 9925814 | 124 |
| Baba | MeteorológicaCompleta | 701663 | 9950344 | 709 |
| Toachi | MeteorológicaCompleta | 700433 | 9932630 | 411 |
| Gualipe | Precipitación | 691978 | 9915880 | 270 |
| Chaune | MeteorológicaCompleta | 670372 | 9925684 | 95 |
| Embalse | Aforos | 675784 | 9925902 | 90 |

5. RESULTADOS

5.1. Calibración.

Para calibración del modelo se utiliza el módulo de optimización automática incluido en el modelo TETIS conocido como "Shuffled Complex Evolution – University of Arizona, SCE-UA"[9]. Mediante el cual se crean estados iniciales aleatorios para los tanques seleccionados evaluando la función objetivo.

Como función objetivo para la presente calibración se utilizó el Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), buscando maximizar la función objetivo.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe es usado para determinar el poder predictivo de modelos hidrológicos, se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_0)^2} \quad (3)$$

Q_0 = descargas medias observadas

Q_m = descargas medias modeladas

Q_0^t = descargas medias observadas en el tiempo t

El coeficiente Nash-Sutcliffe puede variar en el rango $-\infty$ a 1, Un coeficiente de 1 significa un ajuste perfecto entre los datos observados y simulados, un coeficiente de 0 significa que el modelo no aporta predicciones mejores que los propios datos observados, un coeficiente menor que uno indica que los datos observados son mejores en la predicción que el propio modelo.

Algunos criterios para la toma de decisiones son los siguientes.

Tabla 6: Valores referenciales del modelo de Nash Sutcliffe. Fuente [10]

| E | Ajuste |
|-----------|---------------|
| <0,2 | Insuficiente |
| 0,2 - 0,4 | Satisfactorio |
| 0,4 - 0,6 | Bueno |
| 0,6 - 0,8 | Muy bueno |
| >0,8 | Excelente |

La calibración se consigue a partir de factores correctores que incluye el algoritmo de cálculo del programa para la calibración automática, en el caso de la presente simulación estos son los 14 factores correctores calibrados para la precipitación producida entre el 18/1/2018 y el 15/3/2018:

Tabla7: Factores correctores en calibración.

| | |
|--------------------------------------------------|----------|
| Almacenamiento Estático Máximo | 0,95 |
| Evapotranspiración | 1,38 |
| Infiltración | 19,00 |
| Escorrentía Directa | 0,00 |
| Percolación | 1,16 |
| Interflujo | 70,00 |
| Flujo Subterráneo | 0,00 |
| Flujo Base | 11662,20 |
| Velocidad en Red Fluvial | 0,1855 |
| Escalamiento precipitación | 1,83 |
| Almacenamiento Estático (%) | 90,50 |
| Agua En la superficie | 0,00 |
| Almacenamiento Gravitacional (mm) | 15,73 |
| Nivel del Acuífero (mm) | 15,18 |
| Cauce a Sección Llena (%) | 0,03 |
| Factor de interpolación de la Lluvia con la cota | 0,00 |
| Exponente De infiltración al tanque Estático | 8,06 |
| Capacidad Máxima Tanque Gravitacional (%Hu) | 7703,95 |

En primer lugar, se procedió a la calibración de los factores que afectan directamente a la producción de escorrentía. Se ha tenido en cuenta la indeterminación de los estados iniciales de la cuenca y para no tenerlos en cuenta en la simulación se ha determinado en la calibración que se calcule la función objetivo a partir de las 50 horas de simulación.

Posteriormente se han calibrado el estado inicial de los tanques y los otros factores correctores. A partir de los datos obtenidos se han seguido realizando calibraciones. Obteniendo los siguientes resultados en la calibración:

Tabla8: Resultados de la calibración

| | |
|-------------------------|---------|
| CoefNaschSchutcliffe | 0,9014 |
| DifVol | 0,6040 |
| RMSE | 48,7810 |
| Error al pico | 71,0000 |
| Caudal máximo observado | 1029,59 |
| Caudal máximo simulado | 843,78 |
| Error en caudal | -18,05% |

Se obtiene un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,9014.

Se obtiene para la raíz cuadrada del error cuadrático (RMSE) un valor de 48,781.

A continuación, se adjunta gráfica con caudales simulados, observados y precipitación media en la cuenca en el periodo utilizado en la calibración.

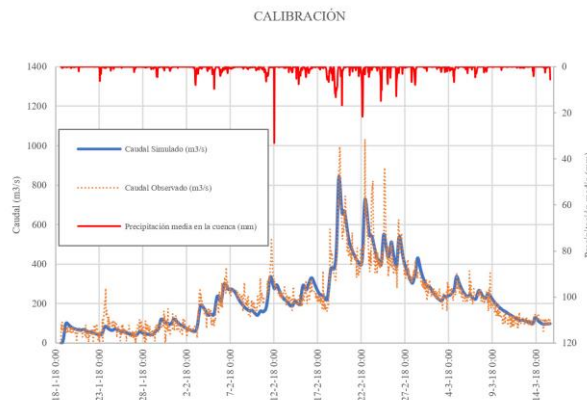


Figura 16. Resultados calibración

Una vez establecidos los factores correctores durante la calibración estos permanecerán fijos durante la validación y demás corridas del modelo.

5.2. Validación.

La validación es necesaria en cualquier modelo para confirmar la fiabilidad de este, esta debe ser basada en datos diferentes a los utilizados en la calibración.

Se han utilizado dos periodos para hacer la validación del modelo, el primero entre los días 15/3/2018 y 31/03/2018 y el segundo entre el 31/3/2018 y 20/4/2018.

Se utilizaron los ficheros de almacenamiento final de cada simulación como almacenamiento inicial de la siguiente simulación. A continuación, los resultados:

5.2.1. Validación 01

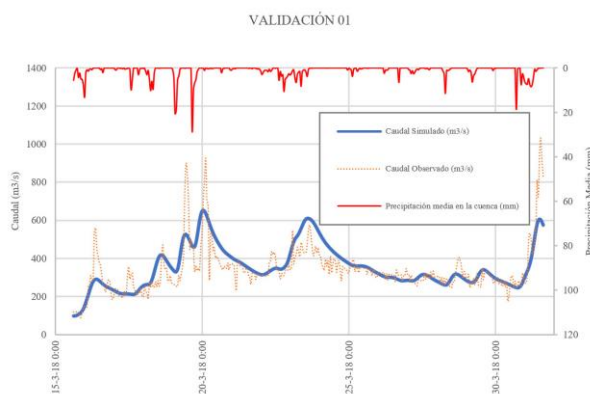


Figura 17. Resultados validación 01



Tabla 9: Resultados validación 01

| | |
|-------------------------|---------|
| CoefNaschSchutcliffe | 0,5538 |
| DifVol | 3,8820 |
| RMSE | 84,3500 |
| Error al pico (dt) | 276 |
| Caudal máximo observado | 1031,81 |
| Caudal máximo simulado | 651,95 |
| Error en caudal | -36,81% |

5.2.2. Validación 02

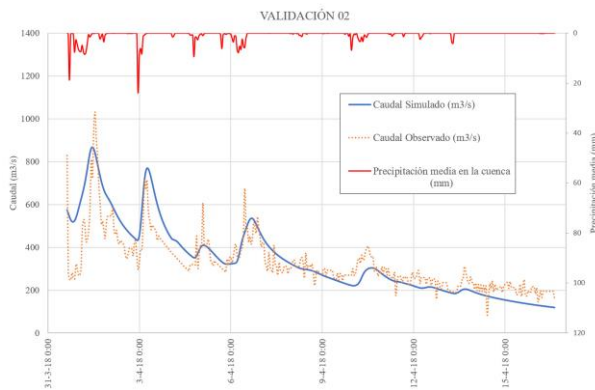


Figura 18. Resultados validación 02

Tabla 10: Resultados validación 02

| | |
|-------------------------|---------|
| CoefNaschSchutcliffe | 0,6692 |
| DifVol | 4,1970 |
| RMSE | 82,4980 |
| Error al pico (dt) | 2 |
| Caudal máximo observado | 1031,81 |
| Caudal máximo simulado | 867,76 |
| Error en caudal | -15,90% |

6. CONCLUSION

El índice de eficiencia del modelo se considera bueno, sin embargo, hay que señalar que para su calibración hubo que aplicar un coeficiente de escalamiento de la precipitación de 1,83, así también durante las diferentes corridas del modelo se detectaron importantes diferencias entre la simulación y los datos reales.

La ausencia de datos de precipitación por la baja densidad de pluviómetros en gran parte de la cuenca disminuye la eficiencia del modelo desarrollado, principalmente en el caso de precipitaciones no homogéneas, tal como sucede en múltiples eventos de precipitación donde la precipitación es variable según la

zona de la cuenca, no solo en intensidad sino también en los tiempos de comienzo y fin.

La carencia de datos en cotas altas de la cuenca es otra fuente importante de errores a la hora de realizar un modelo hidrológico eficiente. Actualmente la estación meteorológica Baba es la más alta de las existentes en la cuenca con 709 m.s.n.m., no existiendo datos de precipitación entre esta cota y los 3179 m.s.n.m. del punto más alto de la cuenca.

La baja densidad de pluviómetros en zonas alejadas del punto de cierre de la cuenca y el hecho particular que los instalados actualmente están alejados de las zonas con mayores tiempos de concentración implica que se esté lejos de cumplir la máxima validez teórica del modelo.

A partir de los datos obtenidos se ha determinado que es prioritaria la incorporación de estaciones pluviométricas nuevas, mediante las cuales se conseguirá mayor densidad de estaciones en la cuenca, así como la incorporación de datos pluviométricos por encima de los 709 m.s.n.m. El modelo dejará de ser muy dependiente de una única estación como la estación meteorológica Baba que actualmente según polígonos de Thiessen representa el 47,66% de la cuenca, obteniendo como resultado un modelo más robusto frente a fenómenos de precipitación localizados. Con este objeto se está gestionando la instalación de tres nuevas estaciones pluviométricas, fig. 18.

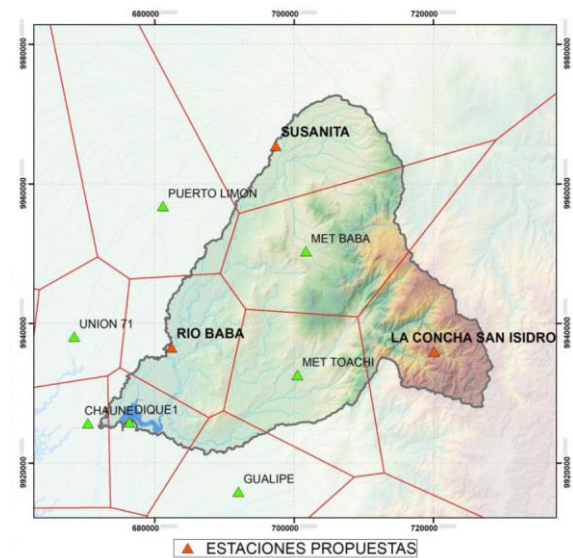


Figura 19. Estaciones propuestas con polígonos de Thiessen, elaboración propia

En base a la capacidad de predicción obtenida por el modelo, se pudo establecer (aún sin la precisión deseada) los caudales que pueden ser turbinados sin ser vertidos.

Para caudales mayores a 300m³/s y debido a la capacidad de regulación del embalse, los mismos no pueden ser aprovechados para generación (turbinados) y

por tanto son vertidos en su totalidad o pueden ser parcialmente trasvasados al embalse Daule Peripa.

Tabla 11: Caudales de ingreso, turbinado y vertido

| Caudal de ingreso estimado (m ³ /s) | Caudal turbinado (m ³ /s) | Caudal vertido (m ³ /s) |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 19-99 | todo | cero |
| 100-129 | todo | depende del nivel inicial del embalse |
| 130-300 | aproximadamente 40% | aproximadamente 60% |

Este modelo además podrá servir para la gestión de riesgos aguas abajo por avenida, anticipando la llegada de altos caudales y haciendo posible una alerta más temprana. Para ello se recomienda la incorporación de este modelo y su automatización dentro de software especializado en integración automática de datos de diferentes orígenes, así como de modelos hidrológicos e hidráulicos de propagación de avenidas dentro de Sistemas de Ayuda a la Decisión y de Alerta Temprana.

También se recomienda en este sentido realizar acercamientos con el INAMHI para implementar los datos del pronóstico de precipitación cuantitativa espacial [11] en el modelo, con lo que se conseguiría aumentar el tiempo de predicción.

A partir de la obtención de nuevos datos se considera la actualización y mejoramiento continuo del presente modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Frances, J. I. Velez, J. J. Velez. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332, pp226-240, 2007.
- [2] J. C. Múnera y F. Francés, "Integración del modelo TETIS en el Sistema de alarma temprana DELFT FEWS para predicción de avenidas en tiempo real en algunas cuencas de la C. H. del Júcar", *Jornadas de Ingeniería de Agua*, Madrid, 2009.
- [3] M. A. Lewis, C. S. CHENEY and B. E. Odochartaigh, *Guide to Permeability Indices*. British Geological Survey Open Report, CR/06/160N, 2006.
- [4] J. J. Vélez, M. Puricelli, F. López Unzu, F. Francés, Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 229-246, 2009.
- [5] F. Francés and C. Múnera. "Modelación hidrológica distribuida de la cuenca de los ríos sassa-besaya con el modelo tetis v.7.2, para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje.". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia, 2008.
- [6] V. T. Chow, D. R. Maidment, L. W. Mays,

Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Interamericana, S.A Colombia, 1994.

- [7] L. B. Leopold and T. Maddock. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. USGS Professional Paper No. 252, 1-57, 1953.
- [8] J. I. Vélez, "Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas.", Tesis Ph.D. U. P. d. Valencia. 2001.
- [9] Q. Duan, S Sorooshian, V Gupta, "Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models", *Water Resources Research*, Vol 28(4), pp.1015-1031, 1992
- [10] P. Molnar, "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland, 2011.
- [11] INAMHI, *Pronóstico Cuantitativo Espacial y Puntual de la Precipitación para Ecuador con uso del modelo WRF*, Dirección de Pronóstico y Alertas Meteorológicas, 2018.



José María Campo Carrera.-

Nació en Madrid, España en 1978. Recibió su título de Ingeniero Civil de la Universidad Politécnica de Madrid en 2012; y su título de Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos de la Universidad de Alcalá y La

Universidad Rey Juan Carlos, Madrid en 2016. Trabaja como especialista hidrólogo en CELEC EP Hidronación, sus campos de estudio están relacionados con la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos y el análisis estadístico de variables hidrológicas.



Mauricio Boada Herrera.-

Nació en Riobamba, Ecuador en 1978. Recibió su título de Ingeniero en Electricidad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral en 2006. Actualmente, se encuentra culminando sus estudios de Máster en Economía y Dirección de Empresas en la Escuela Superior Politécnica del

Litoral. Trabaja como jefe de central en CELEC EP Hidronación y sus áreas de estudio están relacionadas con: los mercados eléctricos, la eficiencia energética, la integración energética regional, las energías renovables y la gestión de la operación y mantenimiento de centrales hidroeléctricas.