

Maestría en Ingeniería Civil

**Método experimental para validar la confianza en la información obtenida
en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos,
logrando resultados más ajustados a la realidad**

Rodolfo Estrowel Díaz Castañeda



Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Bogotá, D.C., 24 de enero de 2023

Método experimental para validar la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos, logrando resultados más ajustados a la realidad

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y medio Ambiente

German Eduardo Acero Riveros
Director

Abraham Salazar Hernández
Codirector



Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Bogotá, D.C., 24 de enero de 2023

La tesis de maestría titulada “Método experimental para validar la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos, logrando resultados más ajustados a la realidad”, presentada por Rodolfo Estrowel Díaz Castañeda, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
Ing. German Eduardo Acero Riveros

Codirector de la tesis
Ing. Abraham Salazar Hernández

Jurado
PhD. German Ricardo Santos Granados

Jurado
Ing. Abraham Salazar Hernández

Jurado
Nombre 3

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2023

Dedicatoria

Esta tesis la dedico con todo el amor a mis hijos, Laura Isabella y Martin Esteban Díaz Cortes, quienes se convirtieron en mi fuerza inspiradora y motivadora de lucha en cada oportunidad en la que intente desfallecer.

Hijos, he aprendido que la vida es una hermosa aventura llena de momentos felices y dolorosos, los alegres disfrútenlos y los tormentosos -aunque les parezca absurdo- resístanlos una y otra vez; sigan adelante sin importar nada, quejarse es una pérdida de tiempo que no trae soluciones.

Espero algún día que cada uno de ustedes comprenda que ser felices depende de la actitud con la que enfrentamos los problemas, no de las condiciones de vida que se tengan. Cuando quieres puedes, el resto simples excusas.

Agradecimientos

A Dios, que por su infinita misericordia me permite sonreír una vez más al cumplir esta nueva meta en mi vida, en este momento comprendo que tú me acompañas cada vez que comparto con los ángeles terrenales que has puesto en mi camino para que me apoyen y guíen, permitiéndome crecer de modo integral.

A mi amada compañera Angge Lorena Cortes Morales, por su inagotable paciencia, abnegación y amor, aun en momentos difíciles, hizo su aporte al logro de este objetivo.

A mis padres, Víctor Manuel Díaz Castañeda (QEPD) y María Inés Sánchez Castañeda, a mi ciudad natal, Santa Marta, que al pensar en ellos me llenan de tranquilidad y recargan mis fuerzas para enfrentar las dificultades.

Al Ing. Pedro Manjarrez González, a quien conozco desde hace más de quince años, convirtiéndose en un ejemplo de vida, sus consejos han llenado mi vida de logros, y me alientan para seguir adelante.

Al Ing. Abraham Salazar Hernández, que por amor a la investigación y en beneficio al ser humano y la sociedad, transmitió su conocimiento y aportó considerablemente al logro de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de ayer y hoy. Un saludo especial para mis compañeros de maestría, Miguel Andrés Mayorga Molina, Andrés E. Prieto Núñez, Leonel I. Aguilar Ochoa, L. Diana Afanador, y Aulio Tovar. Para mis amigos de niñez, Alexander Lemus Salgado, Miguel José Obeso Castro, Carlos Arturo Ferrer Camargo, Wilmar Rincón Bautista, Gustavo Paredes Cáceres, y las Hermanas Nancy y Leidy Giraldo Arcila.

RESUMEN

Los modelos computacionales usados actualmente en la llamada era digital han traído grandes ventajas al mundo de la ingeniería; el hecho de contar con herramientas de modelamiento y simulación asistida por computadoras ha conseguido predecir con una mayor exactitud y menor incertidumbre un sinfín de fenómenos naturales de alta complejidad en tiempos muy cortos, con menor información y rápidas validaciones; sin embargo, estas simulaciones no siempre concuerdan con la realidad, volviéndolas dudosas ante el criterio de un ingeniero experto en el tema. En el área de los recursos hidráulicos siempre se desea tener la mayor certeza frente a un modelo simulado digitalmente, esto no ocurre regularmente y es por lo cual los ingenieros deben guiarse de su experticia y experiencia en el tema para calibrar empíricamente estos modelos; lo anterior justifica que esta tesis tenga como objetivo establecer una metodología experimental que valide la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos logrando resultados más ajustados a la realidad; para esto se propone una metodología en cinco etapas que contempla una revisión literaria, la aplicación de encuestas a expertos, una serie de trabajos en campo, la modelación y calibración con HEC-RAS y HYMO-10 y un análisis comparativo detallado para los resultados obtenidos con diferentes métodos.

El análisis comparativo fue realizado tomando como caso puntual de estudio y calibración de la metodología la cuenca del Río Teusacá, considerando la cercanía con la zona rural de Bogotá, el fácil acceso, bajas profundidades y excelente información hidrológica. Finalmente se logró llegar a concluir que la toma de datos en campo no tiene tanta afectación como la elección de parámetros “aleatorios” como lo es el coeficiente de Manning; además se estableció que los modelos realizados con HYMO-10 guardan una relación con los datos reales observados en campo de aproximadamente 21%, mientras que los modelos realizados con HEC-RAS alcanzan una relación por encima del 90%. Se puede concluir la relevancia del análisis predio de datos que alimenta el modelo simulado ya que de esta forma se puede lograr establecer una aproximación de error entre los distintos modelos.

Palabras Claves: *Modelación hidráulica – Calibración de modelos – validación de modelos – Procedimiento experimental.*

ABSTRACT

he computational models currently used in the so-called digital era have brought great advantages to the world of engineering; the fact of having modeling tools and computer-assisted simulation has managed to predict with greater accuracy and less uncertainty a number of highly complex natural phenomena in very short times, with less information and quick validations; however, these simulations do not always agree with reality, making them doubtful in the opinion of an expert engineer in the field. In the area of hydraulic resources it is always desired to have the greatest certainty in front of a digitally simulated model, this does not occur regularly and that is why engineers must be guided by their expertise and experience in the subject to empirically calibrate these models; the above justifies that this thesis aims to establish an experimental methodology that validates the confidence in the information obtained in the field, necessary to calibrate the hydraulic and water models achieving results more in line with reality; For this purpose, a five-stage methodology is proposed that includes a literature review, the application of surveys to experts, a series of field works, modeling and calibration using HEC-RAS and HYMO-10, and a detailed comparative analysis for the results obtained with different methods.

The comparative analysis was carried out taking the Teusacá River basin as a specific case study and calibration of the methodology, considering its proximity to the rural area of Bogotá, easy access, shallow depths, and excellent hydrological information. Finally, it was concluded that field data collection does not have as much effect as the choice of "random" parameters such as Manning's coefficient; it was also established that the models made with HYMO-10 have a relationship with the real data observed in the field of approximately 21%, while models made with HEC-RAS reach a relationship of over 90%. It is possible to conclude the relevance of the analysis of the data that feeds the simulated model, since in this way it is possible to establish an approximation of the error between the different models.

Key Words: *Hydraulic modeling – Model calibration – Model validation – Experimental procedure.*

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3.	MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN ESTADO DEL ARTE	16
3.1.	MARCO TEÓRICO.....	16
3.1.1.	MODELOS DETERMINÍSTICOS	16
3.1.2.	EXACTITUD DEL MODELO.....	16
3.1.3.	PRESICIÓN DEL MODELO.....	17
3.1.4.	ERRORES EN LOS RESULTADOS DE UN MODELO COMPUTACIONAL.....	17
3.1.5.	PROCESO DE MODELACIÓN	18
3.2.	SOFTWARE/MODELO HIDRÁULICO	20
3.3.	ESTADO DEL ARTE	24
4.	METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO	27
4.1.	METODOLOGÍA.....	27
4.1.1.	REVISIÓN DE LITERATURA	27
4.1.2.	ENCUESTAS.....	27
4.1.3.	TRABAJO EN CAMPO	28
4.1.4.	MODELACIÓN HIDRÁULICA	28
4.1.5.	ANÁLISIS COMPARATIVO	28
4.2.	ZONA DE ESTUDIO.....	29
4.3.	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	32
4.3.1.	INFORMACIÓN MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	42
5.	APLICACIÓN CASO PRACTICO DE ESTUDIO	43
5.1.	HALLAZGOS LITERARIOS.....	43
5.2.	ANÁLISIS Y RESULTADO EN ENCUESTAS.....	43
5.3.	MANEJO Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN CAMPO	44
5.3.1.	OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA CONFIABLE.....	44
5.4.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.....	68
5.5.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO	74
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78

6.1.	CONCLUSIONES	78
6.2.	LIMITACIONES	79
6.3.	APLICABILIDAD	80
6.4.	RECOMENDACIONES	80
	REFERENCIAS	82
7.	ANEXOS	84
7.1.	ANEXO A: HIDROLOGÍA	85
7.2.	ANEXO B: TOPOGRAFÍA HIDROGRÁFICA.....	86
7.3.	ANEXO C: ENCUESTAS	87
7.4.	ANEXO D. AFOROS EN CAMPO.....	88
7.5.	ANEXO E. RESULTADOS MODELACIÓN HYMO-10.....	89
7.6.	ANEXO F. RESULTADOS MODELACIÓN HEC-RAS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un proceso de modelación	20
Figura 2. Diagrama metodológico de sustentación de hipótesis	27
Figura 3 Localización estación hidrológica Puente la Calera Fuente	31
Figura 4. Información básica para modelación hidráulica o hidrodinámica	32
Figura 5. Constantes y variables para un modelo hidráulico	42
Figura 6. Distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera.....	52
Figura 7. Tendencias sugeridas para la distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera.....	55
Figura 8. Tendencia definida de la curva de gastos en la distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera	56
Figura 9. Detalle de la línea de tendencia propuesta para la distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera	57
Figura 10. Dinámica curva de gastos - Procesos de sedimentación y socavación	58
Figura 11. Procesos de sedimentación y socavación de un río	59
Figura 12. Niveles corregidos a la curva de calibración – gastos	60
Figura 13. Primera calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de Calibración a ...	69
Figura 14. Segunda calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de Calibración.....	70
Figura 15. Tercera calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de calibración.....	71
Figura 16. Cuarta calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de calibración	72
Figura 17. Resultado de la simulación – HEC-RAS a	75
Figura 18. Curva de calibración generada sin ajuste de datos.....	76
Figura 19. Resultados de la metodología propuesta.....	77

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Dimensionamiento ancho de la sección	40
Fotografía 2. Medición de la profundidad de la sección del cauce.....	41
Fotografía 3. Determinación de la velocidad del cuse	41
Fotografía 4. Determinación de la pendiente de energía del cauce	41
Fotografía 5. Localización de la Huella Histórica Maxima en Villapinzón – Bogotá D.C.	45
Fotografía 6. Huella de la creciente máxima.....	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Hidrología.....	85
Anexo B: Topografía Hidrográfica	86
Anexo C: Encuestas	87
Anexo D. Aforos en campo.....	88
Anexo E. Resultados modelación HYMO-10	89
Anexo F. Resultados modelación HEC-RAS	90

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del área de recursos hidráulicos, los modelos computacionales se han venido empleando como una herramienta para predecir con mayor exactitud y menor incertidumbre los comportamientos de un fenómeno natural; independientemente del software utilizado, los modelos requieren una calibración y análisis con los cuales se establecerá la aceptabilidad de la dispersión en los datos simulados respecto a los datos observados, cabe resaltar la importancia en cuanto a la validación y confianza de la información obtenida en campo, para ello, la experiencia y reconocimiento previo del modelador es de gran importancia en la evaluación de resultados.

Para reconocer la cercanía de los resultados arrojados por una modelación, con respecto a las condiciones reales del drenaje, es necesario identificar y corregir el efecto de cualquier fenómeno hídrico, esto se logra ajustando los datos observados.

En hidrología, es necesario observar, analizar y priorizar los principales elementos que dan lugar a estos procesos o fenómenos físicos, para posteriormente relacionarlos entre sí por medio de ecuaciones a las cuales se asignan coeficientes y parámetros. Considerando que estas variables son inicialmente desconocidas, se realiza un proceso de calibración del modelo donde se busca identificar los valores con los cuales la serie de datos simulados se ajustan acertadamente a la serie de valores observados.

Ahora bien, el proceso de calibración no es suficiente, como se mencionó, en la mayoría de los casos lo que busca la modelación es predecir un fenómeno natural, por lo que se requiere validar los resultados arrojados por el modelo determinando la discrepancia entre una distribución simulada y una distribución observada, en periodos diferentes al del periodo de calibración.

La premisa que dio origen al desarrollo de este trabajo sostiene que, en la práctica de la modelación la serie de datos arrojados por un modelo hidrológico frecuentemente no es verificada con la serie de datos observados, por lo que se propone un método para validar la confianza de los resultados arrojados por los modelos computacionales hidráulicos.

El presente trabajo está constituido por cinco capítulos que pretenden demostrar la importancia y validez que sostiene la tesis; en el primer capítulo se presentan el marco teórico y la revisión del estado del arte actualmente; dentro del segundo capítulo se presenta la metodología propuesta para la sustentación de la hipótesis de la tesis, además de presentarse el caso puntual de estudio con el cual se realizara la aplicación metodológica presenta dentro de esta tesis; el capítulo 3 contiene los resultados que dan respuesta a la pregunta principal de la tesis de establecer una metodología experimental que valide la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos logrando resultados más ajustados a la realidad; el capítulo cuarto expone las principales conclusiones, hallazgos, limitaciones, aplicabilidad y recomendaciones que se deben tener para próximos estudios relacionados con el tema central de la tesis; finalmente el capítulo cinco señala las referencias bibliográficas consultadas y que establecieron una guía de aprendizaje en la cual esta tesis tiene fundamento académico y profesional.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Establecer una metodología experimental que valide la confianza en la información obtenida en campo, necesaria para calibrar los modelos hídricos e hidráulicos, logrando resultados más ajustados a la realidad.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una guía metodológica que valide la confianza de la información con que se alimenta el modelo para obtener resultados simulados.
- Realizar la modelación hidráulica del tramo de control Puente La Calera del río Teusacá, con el uso del modelo HYMO-10 y HEC-RAS.
- Ajustar los resultados arrojados por el modelo HYMO-10 y HEC-RAS, alrededor del ajuste de la información que se obtuvo de la estación Puente La Calera.
- Exponer la importancia que tiene la calidad de la información obtenida en campo como mecanismo de ajuste a los resultados que genera los procesos de simulación hídrica e hidráulica.

3. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN ESTADO DEL ARTE

3.1. MARCO TEÓRICO

Durante la última mitad de siglo XX y en lo corrido del siglo XXI, se han venido utilizando modelos de simulación computacional en diversos campos de la ciencia, por ejemplo, el aprendizaje de los médicos sobre cuerpos humanos artificiales, el entrenamiento de pilotos de avión en simuladores de vuelo, en los diseños estructurales, sísmicos y geológicos que realizan los Ingenieros para satisfacer necesidades o dar solución a problemas de la sociedad, entre otros muchos; estos modelos generalmente son una representación simplificada tanto conceptual, numérica y gráfica, de fenómenos o situaciones reales externas, que, proporcionan indicios aproximados de su comportamiento, bajo diferente manejo de sus variables, por parte de un colectivo de especialistas.

Dentro de la modelación computacional existe una serie de conceptos altamente relevantes que contextualizan y orientan de una mejor forma la obtención de resultados; a continuación, se describen algunos de ellos.

3.1.1. MODELOS DETERMINÍSTICOS

Un modelo se define como determinístico cuando siempre que se somete a un mismo estímulo produce el mismo resultado, por lo cual la calibración del modelo tiene por objetivo disminuir las diferencias o lograr la exactitud entre los datos simulados y los datos observados. En particular, los modelos determinísticos de simulación o experimentación hidráulica se han usado como herramientas que describen matemáticamente fenómenos hidráulicos complejos difíciles de resolver en corto tiempo, pero dentro de la cual existen condiciones que deben ser controladas para que los resultados esperados tengan en gran medida errores mínimos (García & Chocat, 1999).

3.1.2. EXACTITUD DEL MODELO

Es la capacidad de un instrumento de permitir la cercanía entre los valores simulados y los observados. Un modelo exacto no arroja los mismos resultados, pero cada uno de ellos estará

siempre alrededor de los datos observados, dentro de un rango de aceptabilidad establecido) (Cabrera J. , 2012).

3.1.3. PRECISIÓN DEL MODELO

Mide la dispersión o similitud de un conjunto de valores obtenidos a partir de repetidas simulaciones, sin embargo, estos resultados no necesariamente son cercanos a los resultados observados (Cabrera J. , 2012).

3.1.4. ERRORES EN LOS RESULTADOS DE UN MODELO COMPUTACIONAL

En su informe, Cabrera J. (2012) describe dos tipos de error, los aleatorios, los cuales son inevitables y propios de los procesos de medición que se distribuyen cerca de la medida real (medidas exactas); y los sistemáticos, que se repiten constantemente hacia una misma magnitud (precisión).

El error corresponde a la diferencia entre los valores simulados y los valores observados; mientras que la incertidumbre es una cuantificación de la duda sobre los valores obtenidos por el modelo simulado y cuyo valor no puede ser corregir, sin embargo, de llegar a conocerse el origen del error se podría mejorar la secuencia hasta obtener una mayor exactitud en los resultados entregados. El autor define cuatro fuentes principales de incertidumbre las cuales se describen a continuación

Errores en la estructura del modelo

Es una falla estructural en el modelo en la cual una vez realizado el proceso de calibración el error no puede ser eliminado hasta no ser modificada la estructura computacional este.

Errores en los datos observados

Son errores inherentes a la medición en campo de las variables hidrometeorológicas como caudal, velocidades, niveles, evaporación, evapotranspiración, precipitación, radiación solar, temperatura, entre otros, las cuales son variables implícitas que requiere el modelo para realizar la simulación.

Error en los datos de ingreso

Este tipo de errores no son necesariamente provenientes de la toma de datos en campo, pueden proceder del resultado de cálculos o estimaciones metodológicas de estimación, por ejemplo, cuando se ingresa los datos de caudal y esta serie se obtiene realizando cálculos de acuerdo con el método de aforo usado, la aplicación del método produce errores.

Errores debido a valores no óptimos de parámetro

Son errores asumidos al momento de asignar valores a los parámetros del modelo, ajenos al proceso de optimización.

3.1.5. PROCESO DE MODELACIÓN

La modelación es un método del conocimiento científico en el que se evidencia la capacidad del especialista (modelador) para conceptualizar un fenómeno natural e ingresar información organizada a un modelo dentro de un equipo computacional, para una vez sea procesada dicha información generar una representación simplificada (variables de salida) del fenómeno de estudio.

La estimación del valor exacto generado en cualquier modelo de simulación computacional hidrológico e hidráulico, es imposible. Por lo que resulta necesario conocer la dispersión alrededor del valor observado, esto en función de los errores inducidos en las diferentes etapas de la modelación. Por ello se debe seguir una serie de pasos estándar que evitaren llegar a resultados con una alta dispersión, no hacerlo, asegura en la mayoría de los casos consecuencias no dimensionadas (Fernández, Vela, & Castaño, 1997). Según Cabrera J. (2012), existen ciclos que se deben cumplir en cualquier proceso de modelación hidrológica, estos deben estar concebidos como se presentan en la Figura 1 y como se describen a continuación.

Modelo Perceptual

En esta etapa se priorizan los procesos y variables que intervienen en la generación de caudales, lo que implica observar y analizar características geométricas del canal, pendiente, rugosidad, resistencia a la erosión de laderas, velocidades, niveles, entre otros.

Modelo Conceptual

Etapa en la que se relacionan los procesos y las variables entre sí por medio de ecuaciones.

Modelo Procedimental

Si las ecuaciones que se establecieron son demasiado complejas, se hace necesario simplificarlas para ser procesadas por el modelo.

Calibración

El proceso de calibración es la etapa en la que se asignan valores a los parámetros del modelo, de tal modo que la serie de datos simulados se ajusten lo mejor posible a la serie de datos medidos u observados. Se sugiere aplicar el siguiente método conforme se presenta el orden para lograr la mejor exactitud del modelo:

Prueba y Error: Es el método más usado y recomendado para probar una alternativa y verificar si funciona. Implica un ajuste manual de parámetros basados en el criterio del investigador, por ello se dice que es subjetivo. De este modo se logra una primera aproximación a la exactitud del modelo.

Automática: Posterior a una primera aproximación, se recomienda optimizar estos mismos resultados utilizando técnicas numéricas. Este método es más rápido, objetivo, pero numéricamente complejo. Presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos.

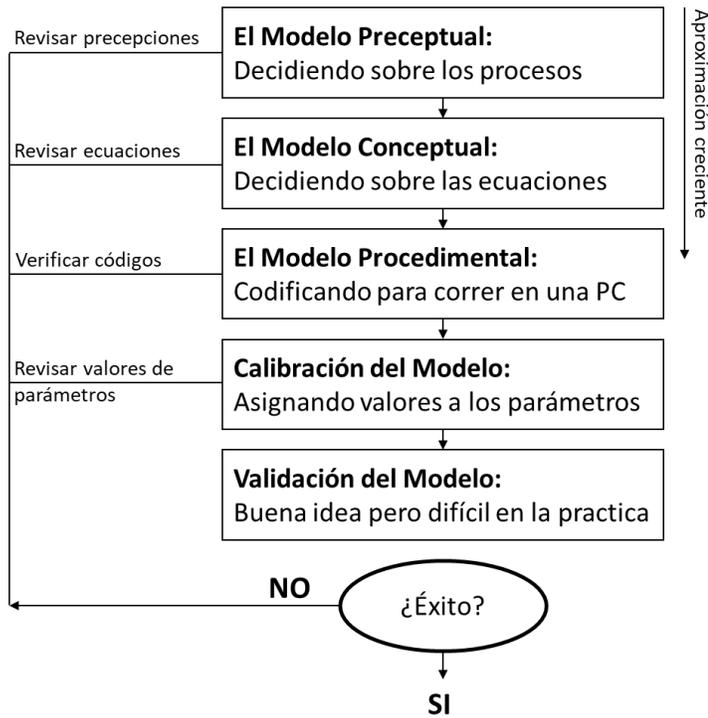
Validación

Refsgaard & Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para periodos fuera del periodo de calibración”. De este modo, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el periodo de validación muestran errores o límites aceptables (Cabrera J. , 2012).

Simulación

Una vez calibrado y validado (verificado) el modelo, se procede a la experimentación con dicho modelo. En otras palabras, se logra la obtención de datos con los que no se contaban hasta ese momento, permitiendo llegar a conclusiones o realizar predicciones. A continuación, se presenta un mapa conceptual de un proceso de simulación.

Figura 1. Esquema de un proceso de modelación
Fuente: Beven (2012, p.4)



3.2. SOFTWARE/MODELO HIDRÁULICO

En la década de los 60's, el Cuerpo de Ingeniero de los Estados Unidos lanza un paquete de programas computacionales que permite el desarrollo de modelos hidrológicos e hidráulicos, a los que llamó "Modelos HEC", sigla que reúne las iniciales en inglés de Hydrologic Engineering Center o Centro de ingeniería hidrológica, lugar donde se experimentaron y desarrollaron los softwares bajo ambiente DOS. En 1968 aparece el HEC-1, hoy denominado HEC-HMS en ambiente Windows la cual adiciona un sistema de modelación hidrológica (HMS –Hydrologic Modeling System), aplicación

poderosa para el modelado hidrológico de cuencas hidrográficas. Las versiones posteriores en ambiente Windows corresponde a numeraciones como la 3.4, publicada en agosto de 2009, donde se inicia la interacción con el modelo HEC-RAS, ya que los hidrogramas generados son almacenados en una base de datos y usados para la disponibilidad de agua, drenaje urbano, predicción de flujo, reducción de los daños por avenidas torrenciales y operación de sistemas; en versiones más modernas, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, ha desarrollado otras aplicaciones, como el Hec-GeoRas y el Hec-GeoHMS las cuales funcionan como extensión para ArcView (Béjar, 2010).

El modelo HEC-2 en ambiente DOS, hoy conocido como HEC-RAS en ambiente Windows, compuesto de las siglas en inglés, HEC - Hydrologic Engineering Center o Centro de Ingeniería Hidrológica, y RAS - River Analysis System o Sistema de Análisis de Ríos. Es una aplicación que permite la modelación hidráulica en régimen permanente y no permanente, transporte de sedimentos, antiguo HEC-8, y análisis de calidad de agua en cauces abiertos, ríos y canales artificiales. La primera versión del Hec-Ras fue presentada en julio de 1995 y sus mejoras desde el Hec-2, están ligadas a una interfaz gráfica de usuario, que facilitó las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante el Hec-GeoRas. Luego vinieron las versiones 1.1, 1.2, 2.0, 2.1, 2.2, 3.0 3.1, 4.0, 4.1,4.2. Hasta aquí el modelamiento del flujo era unidimensional (1D). HEC-RAS ha evolucionado en su versión 5.0, o versión beta, la cual cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua combinando modelos 1D/2D y totalmente 2D. Además, incorpora la ventana de interfaz RAS Mapper, en la que el usuario logra integrar el modelo digital del terreno, como paso inicial para la modelización del flujo (Instituto Didacta, 2016).

En la actualidad existen varios modelos hidráulicos bajo el mismo principio de operación, entre los que se puede mencionar el Sobec, Iber, BRI-STARS, RMA-2, River-2D, CCHE2D, SSIMM, Mike11, entre otros, sin embargo, para la elaboración de este documento son usados los modelo HYMO 10 y el software HEC-RAS, por ser una aplicación informática de acceso libre ampliamente difundida por su fácil interacción con el usuario. Este modelo denominado River Analysis System (RAS), desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) adscrito al U.S. Army Corps Engineers, permite simular en una dimensión bajo condiciones de flujo permanente, no permanente o gradualmente variado en un canal natural o artificial, obteniendo las curvas de parámetros

hidráulicos como la curva de relación nivel – caudal ($Q = f(H)$), la relación nivel – área hidráulica ($A = f(H)$), y la relación velocidad – nivel ($V = f(H)$).

En su tesis, Velandia (2006) resalta las ventajas de Hec-Ras de la siguiente manera:

- Permite calcular el perfil hidráulico considerando el incremento de los caudales a lo largo del río en condiciones de flujo permanente y no permanente.
- Permite evaluar el cambio en los perfiles de la superficie del agua debido a modificaciones en la configuración geométrica del fondo y las bancas del río, y la introducción de jarillones o modificaciones de jarillones existentes.
- Permite considerar valores diferenciales del coeficiente de Manning en cada sección transversal, asignando un determinado valor de este coeficiente al canal principal, banca, zonas de inundación, etc.
- Permite obtener la distribución del flujo en el canal principal, y en las bancas izquierda y derecha, además de permitir conocer la distribución de las condiciones hidráulicas en cada una de las secciones transversales.
- Permite tener en cuenta el efecto de las irregularidades del cauce del río, mediante los coeficientes de contracción y expansión.
- Se puede observar el comportamiento variable del tiempo respecto a diferentes variables hidráulicas del cauce simultáneamente con el tránsito de una onda de flujo (Almacenamiento, velocidades, caudales, Froude, anchos, etc.).
- Permite incorporar estrategias operativas de compuertas y bombas que permiten una mejor representación de las condiciones existentes.
- Se pueden incorporar sistemas de drenaje complejos del cauce principal y afluentes con el objeto de analizar el efecto de remansos y desembocaduras sobre cada uno de los elementos del sistema de drenaje.
- Se pueden involucrar efectos hidráulicos sobre las corrientes inducidas por pilas, puentes, bifurcaciones, vertederos, coulvert.
- Se puede analizar el efecto de las zonas muertas, pondajes, flujos laterales y reboses sobre diques o fallas de jarillones en los valles de inundación.

- Permite seguir el comportamiento de la onda de flujo en un sistema de drenaje hasta 500 puntos a lo largo de un tramo de análisis.
- Permite almacenar y comparar hasta 100 planos adscritos a una misma carpeta bajo diferentes condiciones de modelación.
- Permite realizar comparativos entre las hidrógrafas transitadas y las hidrógrafas observadas en puntos de análisis.
- Permite desarrollar modificaciones, interpolaciones, ajustes de secciones y de geometría en el cauce principal.

El HYMO es un modelo de simulación hidrológica e hidráulica compuesto por un programa principal y 14 subrutinas con aproximadamente 1100 sentencias que ejecutan diferentes operaciones hidrológicas; para el modelo HYMO fue demasiada escasa la información obtenida, sin embargo, se puede mencionar que la versión de 1984 del HYMO 10 es una versión mejorada con respecto a la versión original de 1978.

El programa está codificado en FORTRAN, el cual es un lenguaje de programación utilizado principalmente en matemáticas y aplicaciones de cálculo científico, implementado para funcionar en sistemas con 64K de memoria interna operando bajo el ambiente MS DOS. Este modelo fue usado durante la década de los setenta y ochenta, sin embargo, no evolucionó debido al avance que tuvo el modelo HEC-2.

No obstante, ambos modelos se alimentan básicamente con información hidráulica, topográfica, y con coeficientes de rugosidad. En cuanto al modelo HECRAS, la información hidráulica a ingresar corresponde al caudal del periodo de retorno que se quiera simular, obteniendo como respuesta las relaciones nivel – caudal ($Q = f(H)$), nivel – área hidráulica ($A = f(H)$) y nivel – velocidad ($V = f(H)$). En cuanto al modelo HYMO 10, además de la información hidráulica, topográfica, y coeficientes de rugosidad con el que se alimenta el modelo, adicionalmente se debe ingresar la pendiente del terreno, la pendiente de la lámina de agua, un caudal mínimo con el que inicia el lecho, y un caudal máximo con el que se produce el desborde; obteniendo como respuesta una curva de calibración para la sección donde se quiera construir una bocatoma, puente, o cualquier elemento hidráulico; es así como la curva de calibración permite de modo muy práctico referenciar un caudal para obtener un nivel, área hidráulica o velocidad si así se quisiera.

3.3. ESTADO DEL ARTE

Durante el desarrollo del presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica y documental para establecer algún tipo de procedimiento experimental de calibración y validación en los estudios de modelación hidrológica e hidráulica; como resultado se encontró que en la práctica de la ingeniería, se generaliza el uso de los modelos computacionales cada vez más sofisticados, pero se desconoce la existencia de algún procedimiento de calibración y validación estandarizado y difundido para ser usado en los procesos de simulación.

Esto se confirma al hallar innumerables estudios hidrológicos e hidráulicos donde se recomienda la importancia de calibrar y validar los modelos hidráulicos; otras investigaciones afirma haber calibrado y validado el modelo matemático sin mencionar mayores detalles; en algunas se justifica el uso de procedimientos estadísticos para reducir la incertidumbre en los resultados; mientras otros estudios advierten la propagación del error durante el proceso de modelación; y en algunos pocos se reconoce y advierten las limitantes que se tuvieron para validar el modelo.

Por ejemplo, después de realizar un análisis comparativo con algunos modelos hidráulicos para la modelación hidromorfológica del río Negro, en Antioquia – Colombia, Múnera (2013) concluye, entre otros aspectos, que el proceso de validación “hace parte fundamental para darle validez a los resultados obtenidos en la calibración y con ello tener mejor argumentación y seguridad en los parámetros ajustados, aunque admite que no le fue posible hacer validación por falta de información”.

En particular, el error asociado a la asignación de valores para los parámetros de entrada al modelo tiene que ver con la práctica generalizada de los profesionales en recurrir a la experiencia en momentos de presión-afán para asignar de modo subjetivo el valor del coeficiente de rugosidad de Manning, o en apelar a las tablas o registro fotográfico como patrón para asignar este valor que con el paso del tiempo se generalizó, dejando de lado su cálculo matemático y/o comprobación en campo.

Dentro del libro *hidráulica de canales abiertos* (Chow, 1994), se aclara que, al aplicar la ecuación de Manning la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad n , ya que no existe un método exacto para la selección del valor de este. Seleccionar un valor para el coeficiente

de rugosidad no significa en muchos casos un proceso aleatorio, donde ingenieros especialistas con varios años de experiencia utilizan profundos criterios de ingeniería y práctica para determinarlo, mientras para algunos principiantes no pasa de ser un proceso de adivinanza, y de esta forma diferentes profesionales obtendrán diferentes resultados.

Ahora bien, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), adscrita al Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible dentro de los términos de referencia para la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) ordena que en ausencia de información oficial de series históricas de caudales, se podrán implementar metodologías de estimativos indirectos mediante técnicas de regionalización, correlaciones hidrológicas, relaciones área-precipitación-caudal, modelos de simulación hidrológica alimentados con datos espaciales, hidroclimatológicos y de uso y cobertura del suelo, entre otros (ANLA, 2014); estos métodos se deberán implementar en aquellos cuerpos de agua en los que se proyecte intervención directa, además, se deberá justificar detalladamente la selección de la metodología, sus ventajas y sus limitaciones de acuerdo con la cuenca en estudio, además los modelos de simulación hidrológica deberán estar debidamente calibrados y validados (ANLA, 2014).

Por otro lado, Según Rauscher, Young, Webb, & Rohison (2000), “las comparaciones entre las predicciones del modelo con los datos medidos u observados se deben efectuar usando métodos estadísticos adecuados, con un nivel de confianza aceptable” no obstante, “en muchos casos los nuevos modelos de simulación han sido presentados sin una adecuada validación” (Barrales, Peña, & Fernandez, 2004). Para Reynolds (1984) “una posible razón para esta falta de examen crítico es el hecho que en la literatura científica ha habido relativamente poca discusión sobre la filosofía y procedimientos para este tipo de investigación”.

Aunque Mayer, Stuart, & Swain (1994) propusieron la regresión como técnica de validación, también reconocieron los problemas para probar la exactitud, mientras que el departamento de ciencias animales y vegetales de la University of Sheffield en el Reino Unido objetó la regresión como método de validación (Mitchell, 1997). Sin embargo, “por la familiaridad del método y su uso en sistemas computacionales, es frecuente y erróneamente usado para validar modelos de simulación” (Barrales, Peña, & Fernandez, 2004).

En el trabajo de Barrales, Peña, & Fernández (2004) se desarrolla un ejemplo numérico con el que se ilustra la aplicación e interpretación de dos procedimientos de estadística inferencial, para abordar el problema de validación de modelos, uno desarrollado por Freese en 1960, el segundo es una modificación sugerida a este mismo procedimiento por parte de Rennie y Wiant en 1978; para ambos procedimientos se concluye la falta de exactitud bajo el enfoque de límites de confianza.

Es claro que por lo menos en los países de habla hispana, mientras no se tenga definida una metodología estandarizada para la calibración y validación de los modelos hidráulicos que soporte la confiabilidad en los resultados arrojados, los especialistas en la materia siguen recurriendo a su criterio profesional para realizar simulaciones hidráulicas.

Por otra parte, como complemento al trabajo documental, se realizó una encuesta a algunos reconocidos especialistas en hidrología e hidráulica, para identificar algún procedimiento autodefinido para la validación de los resultados obtenidos en sus procesos de simulación.

Los modeladores, sin mayores detalles, argumentaron haber calibrado el modelo sin desconocer la posibilidad de errores asociados; otros coincidieron en sus afirmaciones, asignar en una única oportunidad, el valor a las variables de entrada al modelo; algunos referenciaron la ausencia de un registro de datos observados para acudir a la validación.

Otro de los profesionales entrevistados en el desarrollo de esta investigación, recomendó el uso del criterio y análisis profesional en el campo de la ingeniería colombiana, antes que dedicarse a la aplicación de métodos estadísticos. Aclara que el uso de uno o tantos modelos computacionales, no definen al especialista. Coincide en la necesidad de contar con una metodología sencilla para lograr la validación de los modelos computacionales.

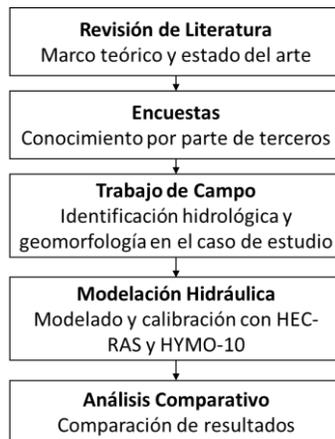
4. METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO

4.1. METODOLOGÍA

Con el objetivo de sustentar la hipótesis de esta investigación, se desarrolló el proceso metodológico presentado en la Figura 2 y descrito a continuación.

Figura 2. Diagrama metodológico de sustentación de hipótesis

Fuente: Elaboración propia



4.1.1. REVISIÓN DE LITERATURA

Se realiza una búsqueda bibliográfica para identificar la existencia de algún tipo de metodología de calibración y validación usada en los procesos de simulación con los modelos hidráulicos, para ello se consultaron investigaciones académicas, estudios y casos prácticos a nivel nacional y latinoamericano. Simultáneamente, se solicitó a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, la información hidrológica histórica existente. Finalmente, toda esta información se recopiló, organizó, y se procesó, para que sirviera de insumo a esta investigación.

4.1.2. ENCUESTAS

Se elaboró y aplicó una encuesta entre especialistas reconocidos en el campo de la hidrología e hidráulica con el objetivo de conocer el procedimiento que siguen para garantizar buenos resultados de sus estudios hidrotécnicos o diseños hidráulicos, además de conocer su opinión o postura crítica

frente a la necesidad de establecer una metodología experimental que valide los resultados obtenidos de un proceso de modelación hidrológica e hidráulica. cabe recalcar que, aunque sus aportes técnicos y académicos se referencian en este documento, se mantiene en confidencialidad la identidad de los colaboradores.

4.1.3. TRABAJO EN CAMPO

Se realizaron algunos aforos líquidos por vadeo y nivelación de pendiente de línea de energía, aproximadamente a unos 30 metros aguas arriba de la estación hidrológica puente la Calera, esta actividad se acompañó de un recorrido general por el rio para identificar la geomorfología del cauce.

4.1.4. MODELACIÓN HIDRÁULICA

Con los datos de campo, y la información secundaria suministrada por la autoridad ambiental, se alimenta y calibra el modelo HEC-RAS y el modelo HYMO-10, los cuales son usados para el desarrollo de este estudio. El levantamiento topográfico del tramo observado y donde se encuentra la estación hidrológica Puente La Calera es suministrado por la CAR, al igual que las curvas de gastos y resumen de aforos de los últimos 15 años.

4.1.5. ANÁLISIS COMPARATIVO

Tomando el registro histórico de los aforos líquidos remitidos por la Corporación Autónoma Regional – CAR, con su respectiva curva de gastos $H=f(Q)$, se verifico la dispersión de los datos para descartar o confirmar la aparición del fenómeno de histéresis, en el cual para un mismo nivel se obtienen diferentes caudales (IDEAM, 2007). De acuerdo con lo establecido por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, esta dispersión ocasionada por factores hidráulicos y morfológicos debe ser ajustada en caso de llegar a ser mayor al 10%.

Logrado el ajuste se obtuvo una nueva curva de gastos $H=f(Q)$, la cual se tomó como herramienta para ajustar los valores de la serie de datos simulados. Durante el proceso de simulación se validarán los resultados arrojados por los dos modelos, determinando la discrepancia entre los datos

simulados y la distribución observada en periodos fuera del ciclo de calibración, logrando así, una alta confiabilidad en los resultados.

4.2. ZONA DE ESTUDIO

La zona puntual de estudio y calibración del modelo será la cuenca del Río Teusacá, Esta estación hidrológica fue seleccionada considerando la cercanía a su área rural de Bogotá, fácil acceso al punto de muestreo, baja profundidad de la sección de aforo, pero principalmente por contar con una red de estaciones hidrológicas ubicadas aguas arriba y aguas abajo de esta estación, lo que permite comparar periodos de datos entre ellas para determinar su confiabilidad.

Desde hace más de un siglo, la esorrentía de la cuenca del Río Teusacá está indirectamente relacionada con el suministro de agua para consumo humano en la ciudad de Bogotá, desde los primeros acercamientos que se hicieron en el año de 1927, cuando los 300.000 habitantes que tenía la capital requerían aproximadamente un metro cúbico de agua por segundo, sin embargo, la cuenca no era hidrológicamente suficiente para cubrir estas necesidades, ya que su caudal medio registrado en la estación hidrológica El Tambor, de la EAAB desde 1939, escasamente superaba este valor con 1,12 m³/s.

El Río Teusacá está ubicado entre los cerros orientales y la sabana de la capital del país dentro del afluente izquierdo del Río Bogotá.. El río de 69 kilómetros de longitud nace a una altitud de 3.560 metros en el Alto Los Tunjos(Santa Fe) y fluye hacia el norte por los municipios de La Calera, Guasca y Sopó para desembocar en el Río Bogotá dentro del municipio de Cajicá a una altitud de 2.554 metros (Fundación Wikimedia, 2021). El área total de la cuenca hasta su desembocadura es de 358,20 km² con un 86 % en zona montañosa y el 14 % a la zona de valle entre La Calera y Sopó, zona dedicada a actividades agropecuarias.

La parte alta de la cuenca y hasta el sitio donde se construyó la presa del embalse de San Rafael, encierra un área de 68 km². El régimen natural de los caudales en la cuenca del Río Teusacá registrado en las estaciones de Puente Francis, ubicada aguas arriba del embalse de San Rafael y Puente La Calera y aguas abajo de la presa, se vieron afectadas posteriormente al año de 1991 cuando se inició la construcción del proyecto San Rafael y especialmente cuando entro en operación

en 1995, ya que el reservorio cumple una función de amortiguamiento de las crecientes y la EAAB permite descargas reguladas. A continuación, se presenta la jerarquización de la red hidrográfica.

Tabla 1. Ordenación de las cuencas hidrográficas
Fuente: Elaboración propia con datos del Decreto 1640 de 2012

Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica
Magdalena - Cauca	Río Bogotá	Río Teusacá

Tabla 2. Ordenación de las cuencas hidrográficas
Fuente: Elaboración propia con datos de la Resolución 577 de 2010

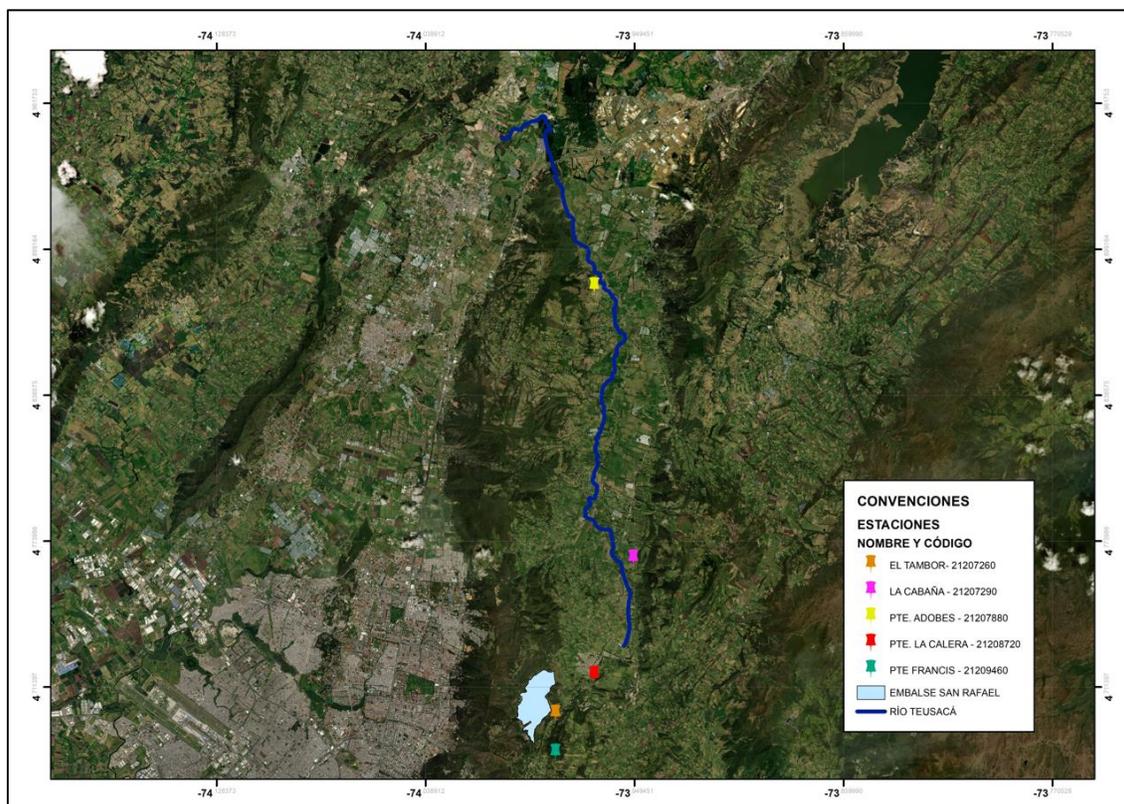
Orden 0	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	
Océano Atlántico	Río Magdalena	Río Bogotá	Río Teusacá	Qda. El Peñón	Qda. La Glorieta	
				Qda. Aguas Claras		
				Qda. Simayá		
				Qda. El Triángulo		Qda. Triángulo 1
				Qda. Las Mercedes		

El embalse de San Rafael tiene una capacidad de 75 millones de metros cúbicos, este volumen garantizará agua para Bogotá durante casi tres meses continuos sin depender del sistema Chingaza cuyas redes suman en total 43 Km. El embalse muerto es de cinco millones de metros cúbicos y 62 millones de metros cúbicos sirven de reserva a los casos de mantenimiento del sistema Chingaza y se consideran 5 millones de metros cúbicos, para ser utilizados en riego en la parte baja del Río Teusacá. Se espera un volumen adicional de 3 millones de metros cúbicos provenientes de las crecientes de la parte alta de la cuenca del río Teusacá aguas arriba del embalse.

El embalse de San Rafael tiene un área inundable de 370 hectáreas y se localiza en una hondonada natural a dos kilómetros de la jurisdicción de la Calera, con un acceso al Embalse de Chuza el cual se surte de la Laguna Chingaza localizada en el municipio de Fómeque (Cundinamarca), pertenecientes al subsistema de abastecimiento de agua de la Empresa de Acueducto de Bogotá y municipios cercanos.

Por su parte, la Estación Puente La Calera está ubicada dentro del área suburbana de la Calera (Cundinamarca) en el occidente de la Provincia del Guavio, a 18 km al nororiente de Bogotá cerca de las localidades de Chapinero y Usaquén. La Estación Puente La Calera permite caracterizar el tramo inicial de la *Zona 2 del corredor ambiental*, concretamente entre la Presa San Rafael y la Urbanización Macadamia, La caracterización del tramo final de la *zona 2 del corredor ambiental* es realizado por la Estación hidrológica La Cabaña, operada por la EAAB ubicada entre las urbanizaciones Macadamia y Potosí.

Figura 3 Localización estación hidrológica Puente la Calera
Fuente: Elaboración propia



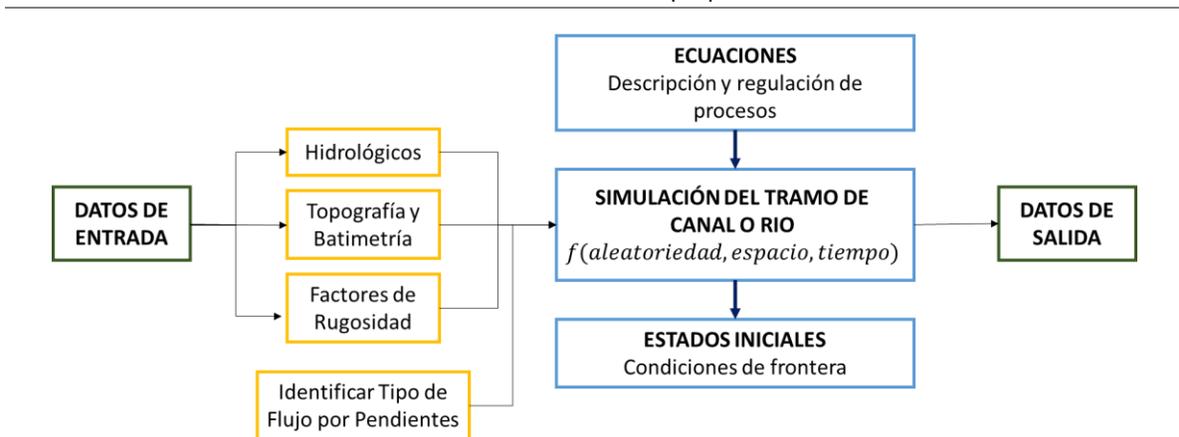
El municipio de La Calera se encuentra entre los 2.600 y 3.000 m.s.n.m., por lo que tiene pisos térmicos frío y páramo; su economía es variada ya que incluye la agricultura tradicional de papa, maíz, cubios, zanahorias, entre otras verduras y la ganadería de vacunos, caballos, ovejas, cabras, piscicultura de truchas etc. Por otro lado, hay una importante explotación minera de piedra caliza y areneras, además de algunas industrias de producción de Cemento de la multinacional Cemex (Cementos Samper trasladada en 1998) y el Agua Manantial de The Coca Cola Company.

La Estación Hidrológica Puente La Calera, es operada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, bajo el código 2120872 de tipo Limnimétrica – LM y ubicada en el área suburbana de La Calera en las coordenadas geográficas 4° 43' 31,584" N 73°57' 32,580" W o en las coordenadas planas 4.725454N, -73.959122W a una altura de 2.689 m.s.n.m.

4.3. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo de este estudio fue necesario revisar la topografía de la zona, con la que se logró obtener la geometría del cauce y niveles; de igual modo se necesitó la serie de datos de caudales, la pendiente de la lámina de agua, y algunas campañas de aforo adicionales propias a esta investigación para brindar algo de valides al ajuste de datos históricos de caudal. La investigación se complementó con encuestas que permitieran conocer el punto de vista de algunos profesionales de reconocida trayectoria en el campo de la hidrología e hidráulica, con respecto a la pertinencia de validar los resultados obtenidos por los modelos. A continuación, en la Figura 4 se relaciona la información obtenida y requerida para el desarrollo de este trabajo.

Figura 4. Información básica para modelación hidráulica o hidrodinámica
Fuente: Elaboración propia



Información Literaria

Factor de rugosidad

Uno de los parámetros más controvertido por su subjetividad en los cálculos hidráulicos es el factor de rugosidad o ampliamente conocido como “Coeficiente de Manning” (n). En la práctica, la mejor

manera de hallar este coeficiente de rugosidad en ríos es por medio de su calibración con mediciones directas en campo. Su determinación se efectúa a partir de la ecuación de Chézy-Manning conociendo el valor del caudal, el área de la sección transversal, el radio hidráulico y la pendiente longitudinal de la línea de energía, la cual se asume igual a la pendiente de la superficie del agua en cada tramo seleccionado; es así como el coeficiente de rugosidad de Manning se define como una expresión de la resistencia hidráulica del flujo del río.

Existen cuatro referencias que desarrollan diferentes procedimientos indirectos para determinar el coeficiente de rugosidad; el más frecuente está relacionado con el uso de tablas del libro de Hidráulica de Canales Abiertos, de V. T. Chow, también se acude a la experiencia asignando directamente factores que son muy apropiados para condiciones de taludes y lecho y otros dos procedimientos que corresponden a la metodología de Cowan, y su modificación o complementación planteada por el Ing. Tomás Ochoa Rubio, en su libro Hidrología, Hidráulica y socavación en puentes.

El coeficiente de rugosidad n es la expresión cuantitativa de todos los efectos que retardan el flujo, ocasionando el aumento de su profundidad incluyendo la propia turbulencia y lo cual supone una pérdida de energía. Considerando la naturaleza múltiple de las pérdidas de energía, lo mejor es buscar la definición de un coeficiente de rugosidad de Manning (n) que incluya el efecto de todos los factores que condicionan la resistencia hidráulica de un río en un determinado tramo. Cada uno de esos factores se puede definir de manera individual para luego sumarlos y obtener un valor único integral; esto se basa en el hecho de que las pérdidas de energía debidas a cada uno de esos factores se suman para producir una resistencia total, y es por esto por lo que se recomienda utilizar el método de Cowan complementándolo de tal manera que considere todas las variables influyentes (Ochoa R., 2020).

El coeficiente de resistencia se puede determinar para un tramo representativo de un río o para una sola sección transversal. En la mayoría de los cálculos manuales se considera un tramo completo con todas las influencias incluidas en el método de Cowan, sin embargo, en la mayoría de los programas de modelación hidráulica como el Hec-Ras o similares, los coeficientes de rugosidad corresponden a cada sección transversal por separado y estos coeficientes pueden variar de una sección a otra, por lo que es necesario tener en cuenta que cuando se utiliza un programa de esta

naturaleza se debe omitir el coeficiente de rugosidad que representa las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal (n_2), lo mismo que el factor que refleja la influencia de las curvas (m_2), debido a que estos dos parámetros son considerados por estos programas de manera separada. También es usual determinar por separado el coeficiente de rugosidad para el cauce principal y para las bancas o para la llanura (planicie) de inundación, incluso, el cauce principal se subdivide en tres partes: la inferior que generalmente contiene los depósitos de sedimentos con su resistencia característica y dos superiores la margen izquierda y la derecha, cuya resistencia se debe fundamentalmente a las asperezas y rugosidades de las paredes

Información de Encuestas de Validación

previamente de formalizarse la elección de la estación hidrológica de estudio y dentro del proceso metodológico para soportar esta investigación, se elaboró un formato tipo encuesta el cual fue distribuido vía correo electrónico a diversos y reconocidos ingenieros nacionales e internacionales especialistas en recursos hidráulicos con más de 10 años de experiencia específica en el uso del tipo de modelos que se trabajara dentro de la investigación, esto con el objetivo de conocer cuáles son las metodologías más usadas en la práctica para determinar el coeficiente de rugosidad, η y así establecer la más conveniente para proponer una metodología de determinación del límite de confianza otorgado a los resultados arrojados por un modelo hidráulico computacional; esta labor complementaria permitió determinar la pertinencia de esta investigación y ratificar la necesidad de establecer una metodología de calibración y validación para los procesos de simulación con modelos hidráulicos. De las más de veinte encuestas remitidas por correo electrónico, se logró obtener respuesta de once de ellas (***Anexo C***).

Información Hidrológica

La cuenca del Río Teusacá cuenta con un buen registro histórico de información hidrológica por su red de estaciones. Desde la parte alta y hasta su desembocadura se observan las estaciones operadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; que adicionalmente, cuenta con una densa red de estaciones climatológicas distribuidas en puntos estratégicos que son útiles para el desarrollo del presente trabajo.

En cuanto a la hidrología, se encuentran instaladas cuatro estaciones de tipo Limnimétrica (LM) ubicadas una aguas arriba del embalse denominada Puente Francis, la cual es operada por la EAAB, otra estación ubicada junto a la presa del embalse de San Rafael denominada El Tambor; Una tercera instalada por la Corporación Autónoma de Cundinamarca – CAR denominada Puente La Calera ubicada junto al Polideportivo de La Calera; Y la cuarta estación instalada por la EAAB denominada La Cabaña entre el Conjunto Residencial Macadamia y la Urbanización Potosí. La existencia de estas cuatro estaciones hidrológicas a lo largo del río Teusacá (Puente Francis, El Tambor, Puente, La Calera y La Cabaña), llevan a considerar esta red una fuente excelente de estudio hidrológico, sin embargo, este tipo de estaciones hidrológicas de tipo limnimétrica (LM) afecta un poco la exactitud de los registros máximos. Por otra parte, las descargas controladas de agua desde el embalse de San Rafael hacen necesario un análisis detallado y especializado de la forma como realizan los aforos y registros de niveles, como también de la obtención de las curvas de gastos y de operación y manejo del embalse por parte del Comité Hidrológico del Río Bogotá. cabe resaltar que las estaciones son operadas por dos entidades distintas en este caso la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB.

A continuación, se presentan las características generales de las estaciones hidrológicas existentes y seleccionadas en la cuenca del Río Teusacá, indicando el tipo de estación, localización, corriente, período de registro, etc.

La estación Puente La Calera, seleccionada para el desarrollo de este trabajo, cuenta con un área de drenaje de 81.8 Km², fue instalada por la CAR en 1991, un poco antes de entrar en operación el embalse de San Rafael, por lo cual, cuenta con cuatro años de información con régimen natural y veintisiete años con régimen influenciado por las descargas del embalse y con la llegada de afluentes.

Antes del embalse, existe la estación de Puente Francis con un área de drenaje de 50.83 Km², que sirve para caracterizar la cuenca del Río Teusacá con régimen natural. La estación Puente Adobes de tipo LG – Limnigráfica que fue instalada por la CAR en 1968 y cuenta con información desde 1969, almacenando treinta y cinco años de registros históricos, la cual está localizada en la parte baja de la cuenca y alcanza a recuperar el régimen natural del río Teusacá ante la llegada de la escorrentía de sus afluentes, donde el río tiene 305.8 Km² de área de drenaje.

Tabla 3. Características generales estaciones hidrológicas del Río Teusacá
Fuente: Elaboración propia con datos de estaciones hidrológicas suministrados por CAR, EAAB e IDEAM (2013)

Código	Tipo	Nombre	Corrientes	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación	F/Instalación
21209460	LM	Pte. Francis	R. Teusacá	La Calera	1008589	1009078	3400	May-1987
21207260	LM	El Tambor	R. Teusacá	La Calera	1011218	1010840	2750	Mar-1929
21208720	LM	Pte. La Calera	R. Teusacá	La Calera	1014108	1013485	2718	Nov-1991
21207290	LM	La Cabaña	R. Teusacá	La Calera	1020694	1012296	2595	Agos-1946
21207880	LG	Pte. Adobes	R. Teusacá	Sopó	1011770	1132210	2552	Feb-1968

Aguas abajo se encuentra la estación La Cabaña, operada por la EAAB con un área de drenaje de 203.3 Km² y a pesar de que cuenta con extracciones para riego y acueductos rurales, su régimen ya muestra una recuperación natural donde las descargas del embalse tienen una influencia mínima. En la Tabla 4 se presentan los parámetros morfométricos de la Estación Puente la Calera.

Tabla 4. Parámetros morfométricos - Estación Puente La Calera
Fuente: Elaboración Propia con datos de la CAR (2020)

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Subcuenca	Río Teusacá	longitud media de las Laderas (m)	0.39
Código Estación	2120872	Ancho Medio Cuenca - B - (km)	3.41
Estación CAR	Puente La Calera	Elongación	6.48
Área Subcuenca (Km2)	75.40	Coficiente de Compacidad - Kc	2.06
Perímetro (Km)	63.92	Cota Máxima (msnm)	3546.19
Longitud Cauce Principal (m)	22989.49	Cota Mínima (msnm)	2689
Longitud Cauce Principal (Km)	22.98	Promedio altura cauce (msnm)	2939.34
Longitud total de drenaje (Km)	95.56	Pendiente Cauce principal (m/m)	0.03
Longitud Lineal de la corriente (Km)	22.10	Altura de la cuenca (msnm)	3081,27
Coficiente de Sinuosidad	1.04	Pendiente de la Cuenca (H cuenca)	13.53
Número de Corrientes	52.00	Profundidad de disección de la cuenca	141.94
Densidad Drenaje	1.27	Nivel de disección del relieve	359.78

Toda la información hidrológica de la Estación Puesto La Calera (**Anexo A**), fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR donde se registra el resumen de aforos, los niveles máximos, medios y mínimos mensuales, los caudales máximos, medios y mínimos mensuales, entre algunos otros archivos.

Tabla 5. Aforos Estación Puesto La Calera
Fuente: Elaboración propia con datos de CAR Cundinamarca

FECHA	AFORO	CAUDAL (m ³ /s)	NIVEL (m)	AREA (m ²)	ANCHO SECCIÓN (B)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
21/01/2008 14:50:00	1	0.108	0.79	0.88	5.00	0.12
11/02/2008 11:40:00	2	0.134	0.71	0.72	3.75	0.19
11/02/2008 14:00:00	3	0.155	0.77	0.98	5.10	0.16
14/03/2008 16:20:00	4	0.135	0.77	0.85	4.75	0.16
14/03/2008 17:30:00	5	0.421	0.83	2.02	6.10	0.21
11/04/2008 12:30:00	6	0.906	0.92	1.83	5.10	0.50
11/04/2008 14:30:00	7	0.153	0.72	1.63	6.00	0.09
24/12/2008 10:00:00	8	1.741	0.85	1.79	6.10	0.97
28/01/2009 13:00:00	9	0.212	0.80	0.32	1.60	0.66
17/02/2009 11:15:00	10	2.238	1.05	3.08	6.40	0.73
30/09/2009 14:25:00	11	0.069	0.56	0.92	4.80	0.08
28/10/2009 09:15:00	12	0.103	0.78	1.08	5.80	0.10
24/11/2009 08:45:00	13	0.051	0.74	0.65	4.90	0.08
23/12/2009 07:50:00	14	0.280	0.87	1.53	6.30	0.18
12/01/2010 15:15:00	15	0.288	0.87	1.55	6.30	0.19
24/02/2010 07:35:00	16	0.285	0.87	1.56	6.30	0.18
17/03/2010 07:30:00	17	0.329	0.90	1.73	6.35	0.19
22/04/2010 08:20:00	18	0.242	0.76	0.98	5.80	0.25
20/05/2010 09:00:00	19	1.287	0.84	6.32	4.50	0.20
10/06/2010 08:50:00	20	0.220	0.63	0.79	4.70	0.28
07/07/2010 07:40:00	21	0.297	0.88	1.32	5.95	0.23
11/08/2010 07:25:00	22	0.173	0.61	0.69	4.70	0.25
15/09/2010 07:35:00	23	0.278	0.65	0.90	4.70	0.31
12/10/2010 08:10:00	24	0.356	0.68	1.02	4.70	0.35
19/11/2010 14:15:00	25	0.373	0.67	1.24	5.00	0.30
17/12/2010 14:50:00	26	0.277	0.63	0.97	4.80	0.29
21/01/2011 13:15:00	27	0.383	0.61	0.67	4.10	0.58
18/02/2011 11:20:00	28	0.670	0.76	1.50	5.20	0.45
18/03/2011 10:35:00	29	0.319	0.65	1.12	5.00	0.29
17/04/2011 09:25:00	30	0.707	0.75	1.72	6.00	0.41
27/05/2011 09:40:00	31	0.528	0.72	1.36	4.50	0.39
27/07/2011 13:50:00	32	2.669	1.04	3.08	6.50	0.87
26/08/2011 13:25:00	33	1.042	0.64	1.32	4.60	0.79
30/09/2011 17:15:00	34	2.380	0.98	2.73	6.50	0.87
28/10/2011 16:00:00	35	2.016	0.98	3.02	6.40	0.67
02/12/2011 16:00:00	36	0.923	0.83	2.14	5.80	0.43
13/12/2011 09:10:00	37	2.692	1.05	3.11	6.50	0.87
30/12/2011 16:00:00	38	1.910	0.95	2.87	6.40	0.67
27/01/2012 16:00:00	39	1.832	0.94	2.79	6.20	0.66
28/02/2012 15:45:00	40	0.224	0.64	1.03	4.20	0.22
27/03/2012 16:00:00	41	2.694	1.05	3.11	6.50	0.87

FECHA	AFORO	CAUDAL (m ³ /s)	NIVEL (m)	AREA (m ²)	ANCHO SECCIÓN (B)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
24/05/2012 13:00:00	42	5.048	1.22	4.53	7.00	1.11
27/06/2012 13:15:00	43	1.439	0.90	2.42	6.00	0.60
26/07/2012 13:10:00	44	3.551	1.08	3.85	5.90	0.92
28/08/2012 12:30:00	45	3.547	1.15	4.54	7.50	0.78
25/09/2012 10:00:00	46	2.839	1.02	2.52	4.60	1.13
28/11/2012 17:20:00	47	1.447	0.70	2.45	6.80	0.59
04/12/2012 13:15:00	48	2.868	0.46	2.34	8.30	1.23
26/02/2013 15:00:00	49	0.294	0.23	1.57	5.70	0.19
27/03/2013 14:30:00	50	0.319	0.24	1.49	6.30	0.21
04/04/2013 13:00:00	51	0.142	0.23	0.27	2.30	0.53
28/05/2013 14:00:00	52	2.143	0.43	2.77	7.00	0.77
02/10/2013 14:30:00	53	0.150	0.24	0.26	2.30	0.59
04/10/2013 13:00:00	54	0.786	0.32	1.70	7.10	0.46
10/01/2014 15:45:00	55	0.303	0.28	0.40	2.40	0.75
04/02/2014 09:40:00	56	0.196	0.23	0.57	4.50	0.34
04/03/2014 09:40:00	57	0.233	0.23	0.93	5.20	0.25
01/04/2014 09:40:00	58	0.160	0.23	0.78	5.10	0.20
06/05/2014 09:40:00	59	0.168	0.24	0.44	2.70	0.38
04/06/2014 09:35:00	60	0.220	0.25	0.71	4.80	0.31
02/07/2014 09:35:00	61	1.203	0.38	1.78	7.00	0.68
29/07/2014 09:35:00	62	0.079	0.20	0.29	2.50	0.28
26/08/2014 09:35:00	63	0.440	0.29	1.16	6.20	0.38
23/09/2014 09:35:00	64	0.192	0.25	0.71	4.50	0.27
21/10/2014 09:40:00	65	0.417	0.31	1.10	5.60	0.38
05/03/2015 09:35:00	66	0.511	0.29	1.39	6.70	0.37
31/03/2015 10:10:00	67	0.367	0.26	0.75	5.20	0.49
27/04/2015 16:20:00	68	0.257	0.26	0.69	4.60	0.38
23/06/2015 09:35:00	69	0.208	0.25	0.60	4.50	0.35
10/08/2015 09:20:00	70	0.210	0.22	0.59	4.50	0.36
08/09/2015 09:35:00	71	2.232	0.40	1.91	6.50	1.17
10/10/2015 09:35:00	72	0.173	0.22	0.84	5.80	0.21
03/11/2015 09:35:00	73	0.179	0.20	0.57	5.40	0.31
23/02/2016 10:30:00	74	0.276	0.26	1.76	5.50	0.16
29/03/2016 10:50:00	75	0.215	0.26	1.17	6.00	0.18
12/04/2016 12:30:00	76	0.477	0.29	1.19	6.80	0.40
11/05/2016 11:30:00	77	0.730	0.32	1.57	6.20	0.46
10/06/2016 15:10:00	78	0.313	0.27	1.53	6.00	0.21
12/07/2016 11:45:00	79	0.931	0.38	1.62	6.60	0.58
09/08/2016 08:40:00	80	0.173	0.24	1.01	4.60	0.17
06/09/2016 09:45:00	81	0.242	0.24	0.96	4.60	0.25
04/10/2016 09:35:00	82	0.940	0.38	2.17	7.10	0.43
02/11/2016 10:25:00	83	1.579	0.45	2.52	7.50	0.63
22/11/2016 10:30:00	84	3.343	0.65	3.37	7.20	0.99
30/11/2016 09:35:00	85	1.504	0.45	2.29	7.10	0.66
03/01/2017 09:25:00	86	0.844	0.35	1.60	6.30	0.53
31/01/2017 09:25:00	87	1.216	0.43	2.01	6.60	0.61
12/09/2017 10:35:00	88	0.471	0.35	1.52	6.50	0.31
10/10/2017 10:00:00	89	0.603	0.37	1.71	6.90	0.35
07/11/2017 09:40:00	90	0.717	0.39	1.80	7.00	0.40
06/12/2017 14:25:00	91	0.521	0.34	1.51	6.70	0.35
16/01/2018 09:35:00	92	0.588	0.37	1.62	6.80	0.36
13/02/2018 09:35:00	93	0.519	0.36	1.65	7.00	0.32

FECHA	AFORO	CAUDAL (m ³ /s)	NIVEL (m)	AREA (m ²)	ANCHO SECCIÓN (B)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
13/03/2018 09:30:00	94	0.368	0.31	1.21	6.40	0.30
10/04/2018 09:20:00	95	2.349	0.51	3.01	7.70	0.78
08/05/2018 08:35:00	96	0.799	0.38	1.87	7.10	0.43
15/06/2018 09:35:00	97	3.092	0.57	3.30	7.80	0.94
14/08/2018 13:40:00	98	0.437	0.36	1.58	7.00	0.28
28/02/2019 08:45:00	99	0.304	0.30	1.40	6.90	0.22
19/03/2019 08:15:00	100	0.301	0.29	1.33	6.80	0.23
09/04/2019 08:45:00	101	0.326	0.30	1.40	6.70	0.23
14/05/2019 09:15:00	102	0.299	0.31	1.24	6.70	0.24
11/06/2019 09:00:00	103	0.344	0.30	1.70	5.30	0.20
10/07/2019 07:00:00	104	0.273	0.34	0.99	6.30	0.28
15/08/2019 13:00:00	105	0.273	0.30	1.31	5.50	0.21
03/09/2019 11:40:00	106	0.412	0.30	1.25	6.80	0.33
02/10/2019 08:35:00	107	0.304	0.30	1.08	6.00	0.28
05/11/2019 14:50:00	108	1.404	0.44	1.98	7.80	0.71
03/12/2019 14:20:00	109	0.574	0.34	1.40	6.30	0.41
09/01/2020 09:40:00	110	0.611	0.35	1.52	6.50	0.40
04/02/2020 14:20:00	111	0.598	0.36	1.58	5.50	0.38
03/03/2020 14:00:00	112	2.636	0.34	8.92	5.50	0.30
09/06/2020 14:30:00	113	0.422	0.35	1.81	5.15	0.23
07/07/2020 12:20:00	114	0.464	0.34	1.96	5.40	0.24
13/07/2020 10:00:00	115	3.603	0.57	3.45	5.50	1.04
11/08/2020 14:00:00	116	0.574	0.38	2.00	5.60	0.29
14/10/2020 12:30:00	117	0.530	0.36	1.94	6.20	0.27
10/11/2020 15:10:00	118	4.764	0.34	16.03	6.50	0.30
19/01/2021 10:00:00	119	0.219	0.30	1.20	5.00	0.18
16/02/2021 17:30:00	120	0.470	0.38	1.17	5.20	0.40
24/03/2021 07:44:00	121	2.476	0.53	2.89	8.10	0.86
21/04/2021 16:26:00	122	0.795	0.31	1.37	7.00	0.58
19/05/2021 07:56:00	123	4.351	0.63	4.06	9.30	1.07

Información Topografía

Una vez suministrada la sección del relieve (superficie subacuática) por parte de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (**Anexo B**), es usada para verificar que la geometría corresponde verazmente a las características reales del río.

Información recolectada en campo

Con la Tabla 5 de resumen de aforos suministrada por la CAR, se construye la curva de gastos elaborada bajo la metodología propuesta en este documento. Como complemento, se realizaron ocho campañas de aforo líquido (**Anexo D**), estos datos se registrarán dentro de la curva de gastos a construir con el objetivo de establecer el grado de exactitud de estos aforos complementarios a la

investigación obtenidos en campo con respecto a la línea de tendencia de la curva de gastos a generar.

Estos aforos se obtuvieron en el punto donde la comisión de topografía liderada por la CAR realiza las batimetrías, esto es aproximadamente a unos 30m – 40m aguas arriba del puente donde se ubica la Estación Puente la Calera. A continuación, en la Tabla 6 se relaciona un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 6 Aforos líquidos realizados en campo para validación de a investigación
Fuente: Elaboración propia

FECHA	AFORO	CAUDAL (m ³ /s)	NIVEL (m)	AREA (m ²)	ANCHO SECCIÓN (B)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
02/10/2021 15:20:00	1	0.830	0.42	2.25	5.80	0.37
23/10/2021 15:45:00	2	0.709	0.37	2.01	5.80	0.35
14/11/2021 14:35:00	3	0.648	0.33	1.86	6.70	0.35
22/11/2021 15:15:00	4	0.709	0.37	2.19	6.40	0.33
13/12/2021 15:20:00	5	0.506	0.32	1.91	6.70	0.27
16/01/2022 14:30:00	6	0.951	0.39	2.28	6.60	0.42
12/02/2022 14:25:00	7	0.740	0.28	1.66	6.40	0.45
20/02/2022 15:45:00	8	0.956	0.42	2.42	6.50	0.40

Fotografía 1. Dimensionamiento ancho de la sección
Fuente: Producción propia



Fotografía 2. Medición de la profundidad de la sección del cauce
Fuente: Producción propia



Fotografía 3. Determinación de la velocidad del cuse
Fuente: Producción propia



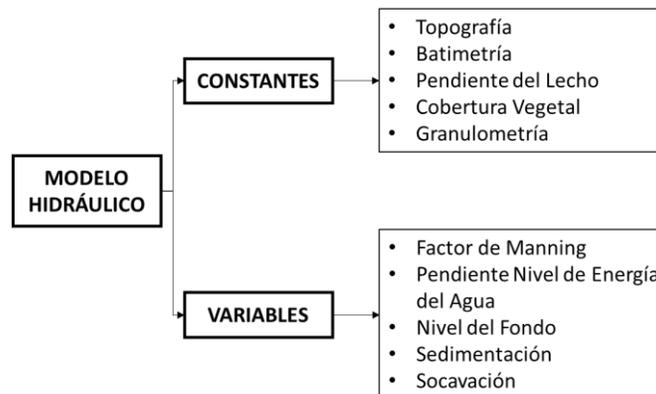
Fotografía 4. Determinación de la pendiente de energía del cauce
Fuente: Producción propia



4.3.1. INFORMACIÓN MODELACIÓN HIDRÁULICA

En los primeros modelos hidráulicos como el HYMO-10, se debe ingresar valores como la pendiente del lecho y la pendiente de energía de la lámina de agua, situación contraria sucede con los actuales modelos hidráulicos como el IBER o el HEC-RAS, que por sus complejas formulaciones puede establecer la topografía como un parámetro de entrada constante mediante la computación espacial de puntos o entre secciones transversales, desconociendo los efectos de socavación o sedimentación; situación similar se presenta cuando se simula una avenida torrencial, donde se omite por insignificancia, la cobertura vegetal y la granulometría. A continuación, en la Figura 5 se presenta la clasificación de los parámetros para un modelo hidráulico.

Figura 5. Constantes y variables para un modelo hidráulico
Fuente: Elaboración Propia



Como variables se considera la pendiente de energía de la lámina de agua en la medida que fluctúa su creciente, como también el nivel del fondo por fenómenos asociados a la socavación, especialmente cuando se presenta una creciente extraordinaria lo cual nos llevaría a realizar un ajustes mediante “prueba y error” en el trabajo de calibración, esencialmente por la falta de mediciones al momento de presentarse el evento hidrológico; sin embargo, es el coeficiente de rugosidad el causal de estos errores de ajuste, debido a su subjetividad y estar asociado a intervalos de valores y variabilidad amplia de escenarios tales como las granulometrías, coberturas vegetales, forma de las secciones, etc., haciendo que su valor exacto, sea objeto de un juego “prueba-error” en comunicación biunívoca con la pendiente de la lámina de agua o de energía.

5. APLICACIÓN CASO PRACTICO DE ESTUDIO

5.1. HALLAZGOS LITERARIOS

Una vez realizada la revisión literaria se pudo establecer que en muchos de los casos de estudio se prefería ecuación de Cowan para el análisis y cálculo del coeficiente de Manning y así la relación original de Cowan se amplía y se modifica como se presenta en la Ecuación (1).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_1 m_2 \quad (1)$$

Dónde:

n_0 es el coeficiente de rugosidad por textura

n_1 es el coeficiente de rugosidad por relieve

n_2 es el coeficiente de rugosidad por variación de forma y tamaño en la sección transversal del cauce principal

n_3 es el coeficiente de rugosidad por obstrucciones al flujo exceptuando vegetación y microformas

n_4 es el coeficiente de rugosidad por vegetación

m_1 son las correcciones al coeficiente de rugosidad por transporte de sedimentos

m_2 son las correcciones al coeficiente de rugosidad por curvas o meandros

Para el presente trabajo se hizo uso de la metodológica de Cowan, complementada por el Ing. Tomás Ochoa Rubio.

5.2. ANÁLISIS Y RESULTADO EN ENCUESTAS

Es claro que estadísticamente las once encuestas contestadas por los especialistas no son representativas, sin embargo, dentro de los principales hallazgos se destaca que los profesionales hidráulicos manifestaron haber incorporado un propio procedimiento de calibración y validación en sus procesos de modelación hidráulica.

A continuación, se discuten generalmente los resultados obtenidos de las encuestas diligenciadas; inicialmente se obtiene que entre un 35% a 45% de los estudios hidráulicos realizados, se prefiere hacer reconocimiento de terreno para luego hacer uso de tablas en la selección de coeficiente de rugosidad y especialmente es consultando por la mayoría el libro de Hidráulica de Canales Abiertos del autor Ven Te Chow; donde además, definen este coeficiente por el método de tanteo soportados

en la experiencia profesional. Estos mismos profesionales indican que al momento de hacer uso de formulaciones matemáticas para la determinación del coeficiente de rugosidad prefieren usar las ecuaciones de Cowan (38%), seguida de la fórmula de Manning (23%) y la ecuación Chézy o Strickler en una menor proporción.

Considerando que no existe una metodología generalizada para la comprobación de los resultados arrojados por un modelo hidráulico, esta encuesta deja entrever que de algún modo existe una libre elección para la validación de estos resultados, partiendo principalmente de información de campo confiable; estas metodologías incluyen usar la velocidad observada como medio de control, el uso del método de velocidad de dos puntos, con datos de precipitación de estaciones cercanas vs aforos en campo, con análisis de sensibilidad aumentando – disminuyendo los valores adoptados del coeficiente de Manning para evaluar la influencia de este factor en la velocidad y profundidad del flujo despejando n de la ecuación de Manning, calibrando los coeficientes de rugosidad al compararlos con las trazas anuales del río con los niveles arrojados por el modelo hidráulico definido el periodo de retorno, o comparación de eventos históricos.

Se pudo evidenciar que, si bien se requiere de la experiencia profesional para desarrollar un proyecto hidráulico, es inherente la subjetividad dentro de este tipo de proyectos; esta conclusión es determinada luego que a cada uno de los encuestados se le pidiera relacionar un coeficiente de rugosidad (n) para cada una de las márgenes del Río Bogotá que se presentó dentro de la encuesta. Por la importancia de la variable, se amplía la discusión con respecto al factor de rugosidad, estableciendo porque se propone usar el método de Cowan, modificado o complementado.

5.3. MANEJO Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN CAMPO

5.3.1. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA CONFIABLE

Se presentan dos alternativas para obtener resultados confiables en un proceso de simulación ejecutado por un modelo hidráulico, la primera alternativa, para generar la información cuando no existe registro de esta, la segunda alternativa, para procesar, corregir o ajustar, tanto los registros históricos de caudal existente, como los coeficientes de rugosidad de Manning n de la sección.

Método Indirecto - Huella Histórica Máxima

La gran mayoría de sitios que se visitan para hacer estudios hidrológicos e hidráulicos, diseño y posteriormente construcción, no cuentan con una estación hidrológica cercana, inclusive, no hay dentro de la misma cuenca o río que se estudia; Por lo tanto, se debe recurrir a métodos indirectos para generar la información hidrológica necesaria para calibrar y validar los resultados generados por un modelo hidráulico.

Uno de los métodos más usados en los países con amplio desarrollo científico, está relacionado con la determinación en campo de la Huella Histórica Máxima – HHM. Esta huella corresponde al rastro dejado por una creciente extraordinaria sobre taludes, árboles, estructuras hidráulicas, viviendas, o cualquier otro sitio de referencia; En otros casos los mismos pobladores pueden recordar e indicar hasta donde llegó el nivel del agua. Cabe aclarar que la huella puede ser localizada o estimada por un ingeniero especialista en hidrología o geología (específicamente en geomorfología) y dependerá de la experticia y criterio es este.

La Huella Histórica Máxima – HHM no necesariamente se ubica dentro del cauce de un cuerpo de agua, un ejemplo típico se encuentra a unos 500 m aguas arriba del área urbana del municipio de Villapinzón – Cundinamarca, en donde el dueño de una vivienda ubicada a unos 75 m del borde del río señaló el rastro dejado por el fenómeno de la niña de 2012 al interior de su vivienda, 0,33 m como se presenta en la Fotografía 5

Fotografía 5. Localización de la Huella Histórica Máxima en Villapinzón – Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia con suministro del Ing. Abraham Salazar Hernández



Para determinar el caudal de una creciente extraordinaria en el tramo de un río donde se vaya a construir una estructura hidráulica o ejecutar una obra de protecciones necesario contar con la siguiente información:

- Topografía del tramo
- Sección transversal hasta la HHM
- Altura o cota de la huella histórica máxima
- Área hidráulica de la sección para la HHM
- Pendiente del tramo
- Factores de rugosidad

Como ejercicio práctico, y con ayuda de las miras ubicadas debajo del puente tal como se presenta en la Fotografía 6, y apoyados en el modelo HYMO-10 se tomará la estación Puente La Calera, para realizar un análisis de la creciente máxima:

Tabla 7. Levantamientos para el Análisis de Huella de Máxima Creciente
Fuente: Elaboración propia

PARÁMETRO	LECTURA
Lectura de Mira	1.95 m
Área hidráulica (A)	22.7125 m ²
Perímetro Mojado (P)	34.9429 m
Elevación del nivel del agua	2679.248 msnm
Ancho del río (B)	18.62 m

Fotografía 6. Huella de la creciente máxima
Fuente: Elaboración propia con suministro del Ing. Abraham Salazar Hernández



A continuación, se describen los cálculos realizados y resultados obtenidos para el análisis de Huella Máxima Creciente para el cruce puntual de estudio.

Radio Hidráulico (R)

$$R = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (2)$$

$$R = \frac{22,713 \text{ m}^2}{34,943 \text{ m}} = 0,650 \text{ m}$$

Profundidad Media (h_{med})

$$h_{med} = \frac{\text{Área}}{\text{Ancho del río}} \quad (3)$$

$$h_{med} = \frac{22,713 \text{ m}^2}{18,620 \text{ m}} = 1,219 \text{ m}$$

Ahora, se debe calcular el Caudal mediante el uso de la *Ecuación de Continuidad*.

$$Q = A * V_{media} \quad (4)$$

Donde:

- Q: La descarga por la sección transversal o caudal en m³/seg
- A: Área hidráulica de la sección transversal en m²
- V_{med}: La velocidad media del flujo en m³/s

En donde, aunque se conoce el área hidráulica, no se conoce la velocidad media del flujo: V_{med}, por lo que se recurre a la fórmula o expresión clásica simplificada de la hidráulica y conocida hasta el día de hoy, como *Ecuación de Chézy*

$$V = C * \sqrt{R * S} \quad (5)$$

Donde:

- V_{med}: Velocidad media del agua en la sección transversal (m/seg)
- R: Radio Hidráulico (m)
- S: Pendiente longitudinal de la superficie de la lámina de agua del tramo del río (m/m), pendiente longitudinal del canal, pendiente de la superficie del agua, pendiente de la línea de energía, o pendiente de fricción, (m/m)
- C: Coeficiente de resistencia hidráulica (m^{0.5}/seg).

Se conoce el radio hidráulico, la pendiente del tramo, pero no el coeficiente de Chezy "C". Se pueden usar alguna de las siguientes fórmulas, o promediar el resultado de todas ellas, según criterio profesional, para estimar este valor.

- a. Ecuación de Robert Manning:

$$C = \frac{1}{n} h_{med}^{1/6} \quad (6)$$

Como la HHM fue tomada como lectura de mira en la sección transversal bajo el puente, se establecen los siguientes números de rugosidad de Manning:

Margen derecha: $n_1 = 0,014$

Costado del puente en concreto, donde están ancladas las Miras

Lecho del río: $n_2 = 0,035$

Con gravas de hasta 0.15 m de diámetro, tramo recto, con alta pendiente

Margen izquierdo: $n_3 = 0,040$

Con pastos, pocos arbustos, y talud con pendiente inclinada 45 grados

Para el uso de las fórmulas matemáticas, se promedia el factor de rugosidad de la sección transversal: $n = 0,029$

$$C = \frac{1}{0,029} 1,2198^{1/6}$$

$$C = 35,65$$

b. Ecuación de Pablosky:

$$C = \frac{1}{n} h_{med}^y \quad (7)$$

Como $R = 0.65$, es menor a 1.0, se aplica:

$$y = 1,5 \sqrt{n}$$

$$y = 1,5 \sqrt{0,029}$$

$$y = .0255$$

$$C = \frac{1}{0,029} 1,2198^{0,255}$$

$$C : 36,275$$

c. Ecuación de G. V. Zhelesniakov:

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \log R) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \log R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0,13} \left(\frac{1}{n} + \sqrt{g} * \log R \right)} \quad (8)$$

La siguiente tabla definida por Zhelezniakov, permite calcular los valores de C en función de h_{med} , y de la rugosidad n . La profundidad media corresponde a la primera columna, mientras que el coeficiente de Manning n , corresponde a las demás columnas; es así como dentro de la siguiente tabla se ubica la profundidad media anteriormente calculada, $h_{med} = 1,219$ m, y posteriormente el factor de rugosidad, $n = 0.029$ del río Teusacá, para definir el coeficiente de Chézy, el cual correspondió a $C = 34.5$.

Tabla 8. Valores para la determinar el coeficiente C

Fuente: (Chow, 1994)

R -hmed mts	Coeficiente de Manning - n									
	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050	0.080	0.100	0.200
0.10	80.7	49.2	34.5	26.0	20.5	14.1	10.5	5.47	3.92	1.01
0.20	86.3	54.3	38.7	29.7	23.8	16.8	12.7	7.00	5.20	1.79
0.30	89.7	57.3	41.4	32.1	26.0	18.6	14.3	8.09	6.13	2.37
0.40	92.1	59.5	43.4	33.9	27.6	20.0	15.5	8.98	6.89	2.86
0.50	94.0	61.2	44.9	35.3	28.9	21.1	16.5	9.73	7.54	3.29
0.60	95.6	62.6	46.2	36.5	30.0	22.7	17.4	10.4	8.12	3.68
0.70	96.9	63.8	47.4	37.6	31.1	22.6	18.1	11.0	8.65	4.04
0.80	98.0	64.9	48.3	38.4	31.8	23.7	18.8	11.5	9.13	4.38
0.90	99.1	65.8	49.2	39.3	32.6	24.4	19.4	12.0	9.58	4.69
1.00	100.0	66.7	50.0	40.0	33.3	25.0	20.0	12.5	10.00	5.00
1.20	101.6	68.2	51.4	41.3	34.5	26.1	21.0	13.3	10.8	5.56
1.40	103.0	69.4	52.6	42.4	35.6	27.1	21.9	14.1	11.4	6.07
1.60	104.1	70.5	53.6	43.4	36.5	27.9	22.7	14.3	12.1	6.55
1.80	105.0	71.5	54.5	44.3	37.4	28.7	23.4	15.4	12.6	7.00
2.00	106.1	72.4	55.4	45.4	38.1	29.4	24.1	16.0	13.2	7.43
2.50	108.1	74.3	57.1	46.8	39.8	31.0	25.6	17.2	14.4	8.41
3.00	109.7	75.8	58.6	48.2	41.1	32.2	26.8	18.3	15.4	9.28
3.50	111.1	77.1	59.9	49.4	42.3	33.3	27.8	19.3	16.3	10.1
4.00	112.3	78.3	61.0	50.5	43.3	34.3	28.8	20.2	17.1	10.8
4.50	113.4	79.3	61.9	51.4	44.2	35.2	29.6	20.9	17.9	11.5
5.00	114.3	80.2	62.8	52.2	45.1	36.0	30.4	21.6	18.6	12.1
5.50	115	81.0	63.6	53.0	45.8	36.7	31.1	22.3	19.2	12.7
6.00	116	81.8	64.4	53.7	46.5	37.4	31.7	22.9	19.8	13.2
6.50	117	82.5	65.0	54.4	47.2	38.0	32.3	23.5	20.4	13.8
7.00	117	83.1	65.6	55.0	47.8	38.6	32.9	24.0	21.0	14.2
7.50	118	83.7	66.2	55.6	48.3	39.1	33.4	24.5	21.4	14.7
8.00	119	84.3	66.8	56.1	48.8	39.6	33.9	25.0	21.0	15.2
8.50	119	84.8	67.3	56.6	49.4	40.1	34.4	25.4	22.3	15.6
9.00	120	85.4	67.8	57.1	49.8	40.6	34.8	25.9	22.7	16.0
9.50	120	85.8	68.3	57.6	50.3	41.0	35.3	26.3	23.1	16.4
10.00	121	83.6	68.7	58.0	50.7	41.4	35.7	26.7	23.5	16.8
11.00	122	87.1	69.5	58.8	51.5	42.2	36.4	27.4	24.2	17.5
12.00	122	87.9	70.3	59.5	52.2	42.9	37.2	28.1	24.9	18.1
13.00	123	88.6	71.0	60.2	52.9	43.6	37.8	28.7	25.5	18.7
14.00	124	89.3	71.6	60.9	53.5	44.2	38.4	29.3	26.1	19.3
15.00	124	89.9	72.2	61.5	54.1	44.8	39.0	29.9	26.7	19.8
16.00	125	90.5	72.8	62.0	54.6	45.3	39.5	30.4	27.2	20.4
17.00	126	91.0	73.3	62.5	55.2	45.8	40.0	30.9	27.7	20.8
18.00	126	91.6	73.8	63.0	55.7	46.3	40.5	31.4	28.2	21.3
19.00	126	92.0	74.3	63.5	56.1	46.8	40.9	31.8	28.6	21.8
20.00	127	92.5	74.8	64.0	56.6	47.2	41.4	32.2	29.0	22.2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos usando tres diferentes métodos de cálculo del coeficiente de Chézy – Manning:

Manning C = 35.664

Pablosky C = 36.275

Zhelesniakov C = 34.50

Promedio C = 35,480

Para este trabajo práctico, se tomará el resultado promedio de los tres valores calculados, el cual casualmente fue generado al usar la ecuación de Robert Manning. Se puede usar este mismo procedimiento, o simplemente usar la formula con la que mejor se sienta identificado profesionalmente.

Para la estimación del caudal de la sección transversal al paso de la creciente, se usa la fórmula general de Chézy, así:

$$Q = A C \sqrt{R} \sqrt{S}$$

Se reemplazan los valores tomando para R, h_{med}

$$Q = 22,7125 * 35,664 * \sqrt{1,2198} * \sqrt{0,00826}$$

$$Q = 81,31 \text{ m}^3/\text{seg}$$

En cuanto a la velocidad del agua

$$V = 81,31/22,7125$$

$$V = 3,57 \text{ m}/\text{seg}$$

A modo académico, y para otorgar credibilidad al anterior calculo, se hace uso del modelo HYMO 10, para la cota $h = 1.95$, o en cotas reales $H = 2679.25$ msnm, El Q obtenido es $77,792 \text{ m}^3/\text{s}$, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Parámetros hidráulicos – sección de mira
Fuente: Elaboración propia con datos tomados en campo

SECCIÓN DE MIRA				SECCIÓN DE MIRA			
Nivel	Área	Caudal	Velocidad	Nivel	Área	Caudal	Velocidad
2677,27	0,00	0,00	0,00	2678,56	13,47	36,162	2,685
2677,40	0,36	0,185	0,514	2678,69	15,01	43,348	2,888
2677,53	1,17	0,716	0,612	2678,82	16,56	51,045	3,082
2677,66	2,64	2,389	0,905	2678,95	18,27	59,271	3,244
2677,79	4,18	5,156	1,233	2679,08	20,26	68,189	3,366
2677,92	5,73	8,709	1,520	2679,21	22,32	77,792	3,485
2678,05	7,28	12,969	1,781	2679,34	24,44	88,101	3,605
2678,18	8,82	17,882	2,027	2679,47	26,57	99,07	3,729
2678,31	10,37	23,405	2,257	2679,60	28,71	110,649	3,854
2678,43	11,92	29,507	2,475	2679,73	30,84	122,816	3,982

Se puede determinar que los resultados arrojados mediante el uso de ecuaciones matemáticas son similares a los resultados arrojados por la simulación hidráulica, además de haber obtenido el caudal que paso por la sección transversal de la HHM.

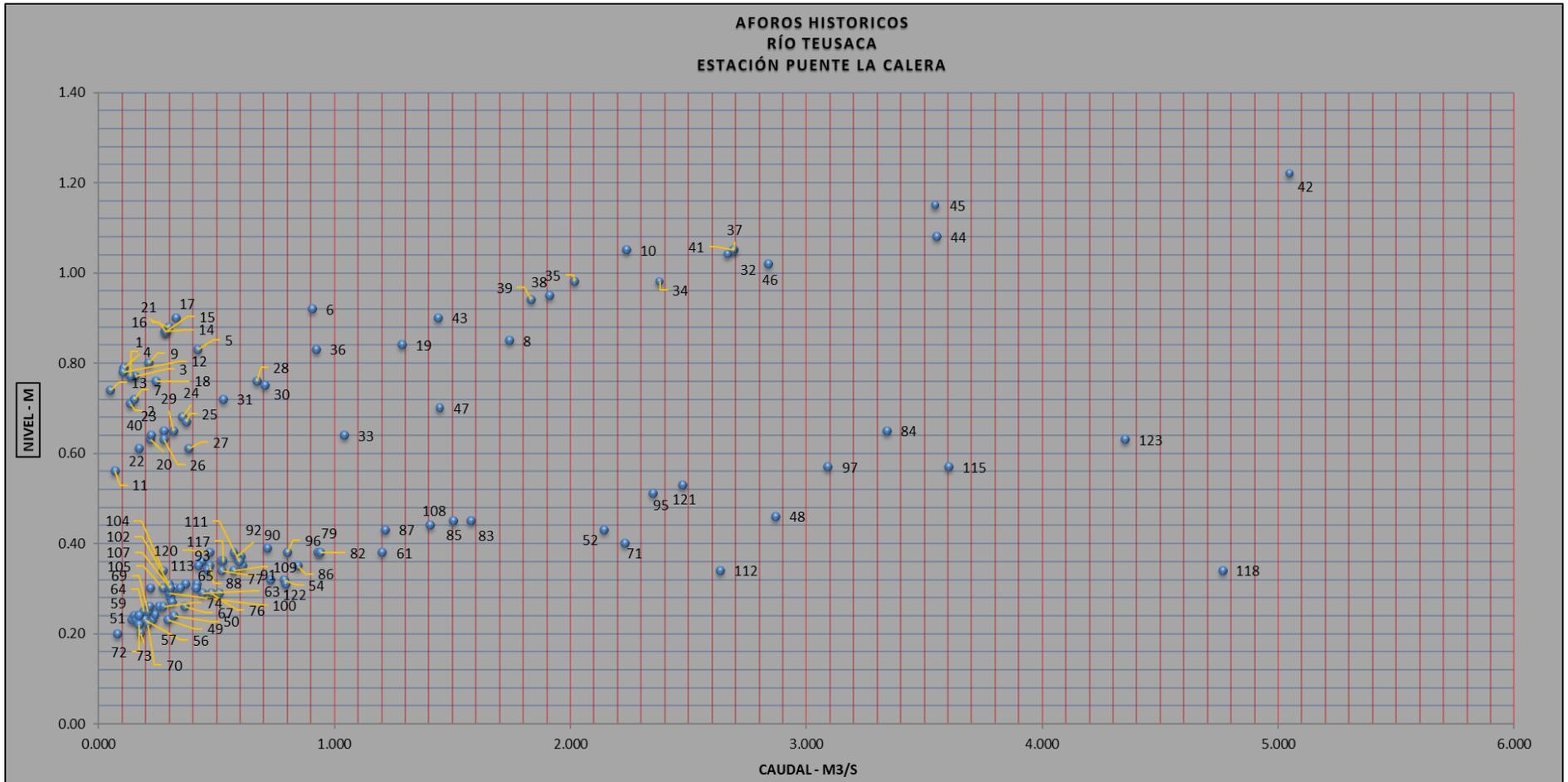
Método Directo – Por medio del Registro Histórico de Aforos

A diferencia del método indirecto, cuando existe una estación hidrológica se solicita a la entidad encargada la sabana de aforos históricos, la cual para el caso específico del caso de estudio corresponde a datos desde el año 2008 al 2020 y que generalmente se ordenan ascendente los datos aforados desde el más antiguo al más reciente.

Mediante una gráfica de dispersión se pueden representar los datos históricos suministrados de caudal vs nivel, incluyendo la numeración que se sugirió anteriormente para identificar de forma rápida datos particulares. La gráfica permite analizar el comportamiento del flujo con respecto a su nivel a través del tiempo, de este modo y bajo la experiencia del profesional se puede establecer una confiabilidad de la información recibida o por el contrario identificar el origen del error en los datos que presenten inconsistencia y así realizar las respectivas correcciones.

A continuación, en la Figura 6 se presenta la dispersión en los datos de aforo en la estación Puente La Calera que servirá como principal insumo de análisis.

Figura 6. Distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera
Fuente: Elaboración propia



En la Figura 6 presentada anteriormente se pueden observar dos grupos de datos, por lo que se podrían generar dos curvas de calibración o gasto; sin embargo, como se mencionó es aquí donde se requiere la experticia profesional para establecer relaciones entre los datos e identificar una línea de tendencia, considerando fenómeno de histéresis, sedimentación y/o socavación. En este paso no se recomienda generar la línea de tendencia con la ayuda de programas especializados como Excel, debido a que estos tipos de programas informáticos especializados son construidos para entregar resultados estadísticos independientemente de la confiabilidad, coherencia o acierto en la información suministrada.

De la Figura 6 se puede proyectar tres curvas de tendencia tal como se presenta en la Figura 7; las dos primeras representadas con puntos verdes y rojos, muy cerca una de la otra con niveles de entre 0,60 m a 0,80 m respectivamente y una tercera curva representada con puntos de color amarillo con un nivel entre 0,15m a 0,50m; esto lleva a considerar que se ha generado un descenso del nivel del fondo del río de 0,20m entre las dos primeras curvas, mientras se presenta una diferencia de 0.50m de nivel con respecto a la tercera curva.

Adentrado en el análisis de la información, es visible que los datos exhiben mayor exactitud hacia la línea de tendencia señalada con puntos amarillos. Sin embargo, verificando la información en detalle se decide excluir los datos correspondientes al periodo entre los años 2011 – 2012 al coincidir con el fenómeno de la niña, el cual trajo un aumento considerable de las lluvias en la zona y por tanto aumento de caudales. Los datos registrados después del 2012 y hasta el 2020 permitieron definir la curva de gastos.

Haciendo la respectiva corrección de niveles (H corregida), se puede establecer que en el periodo comprendido entre diciembre de 2012 y octubre del de 2016 se presentaron fenómenos de sedimentación y después del mes de octubre de 2016 hasta la fecha se han venido presentando procesos de socavación.

Recurriendo a la experiencia profesional se concluye que, de las tres tendencias de curva de calibración presentadas, la que genera un mejor ajuste en la distribución de los datos considerando factores hidráulicos y morfológicos es la que se presenta con color amarillo (curva inferior); por lo cual es definida como la curva de tendencia para esta investigación y representa el gasto vigente para el cauce.

Trazar una línea media a mano alzada, entre la nube de puntos o aforos para generar una curva de calibración es el trabajo habitual que se desarrolla en algunas de las entidades a nivel nacional e internacional que opere estaciones hidrológicas; esta labor que es recomendada por la Organización Meteorológica Mundial – OMM. Sin embargo, la metodología que se presenta en este trabajo sugiere aportar confiabilidad y validación a la información que generan las estaciones para proceder tal y como recomienda la organización.

Seguidamente, se realiza el proceso de calibración de los resultados arrojados por el modelo, bajo el método de prueba y error, buscando una mejor aproximación a la curva de calibración. El método de prueba y error se aplica según lo considere el profesional, a la pendiente de energía, factor de rugosidad, pendiente del lecho según la topografía.

Figura 7. Tendencias sugeridas para la distribución del registro histórico de aforos en Puente La Calera
Fuente: Elaboración propia

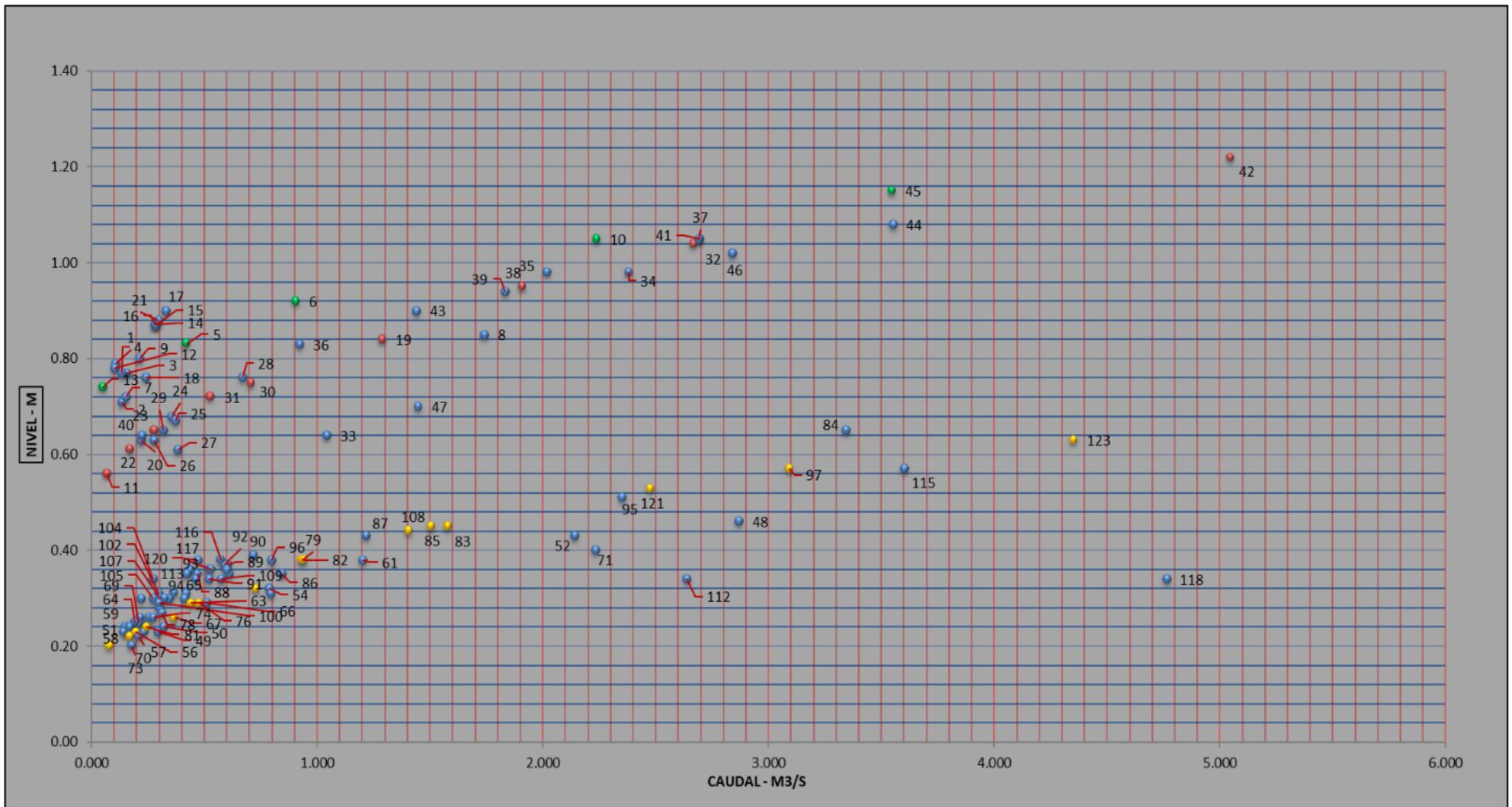


Figura 8. Tendencia definida de la curva de gastos en la distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera
 Fuente: Elaboración propia

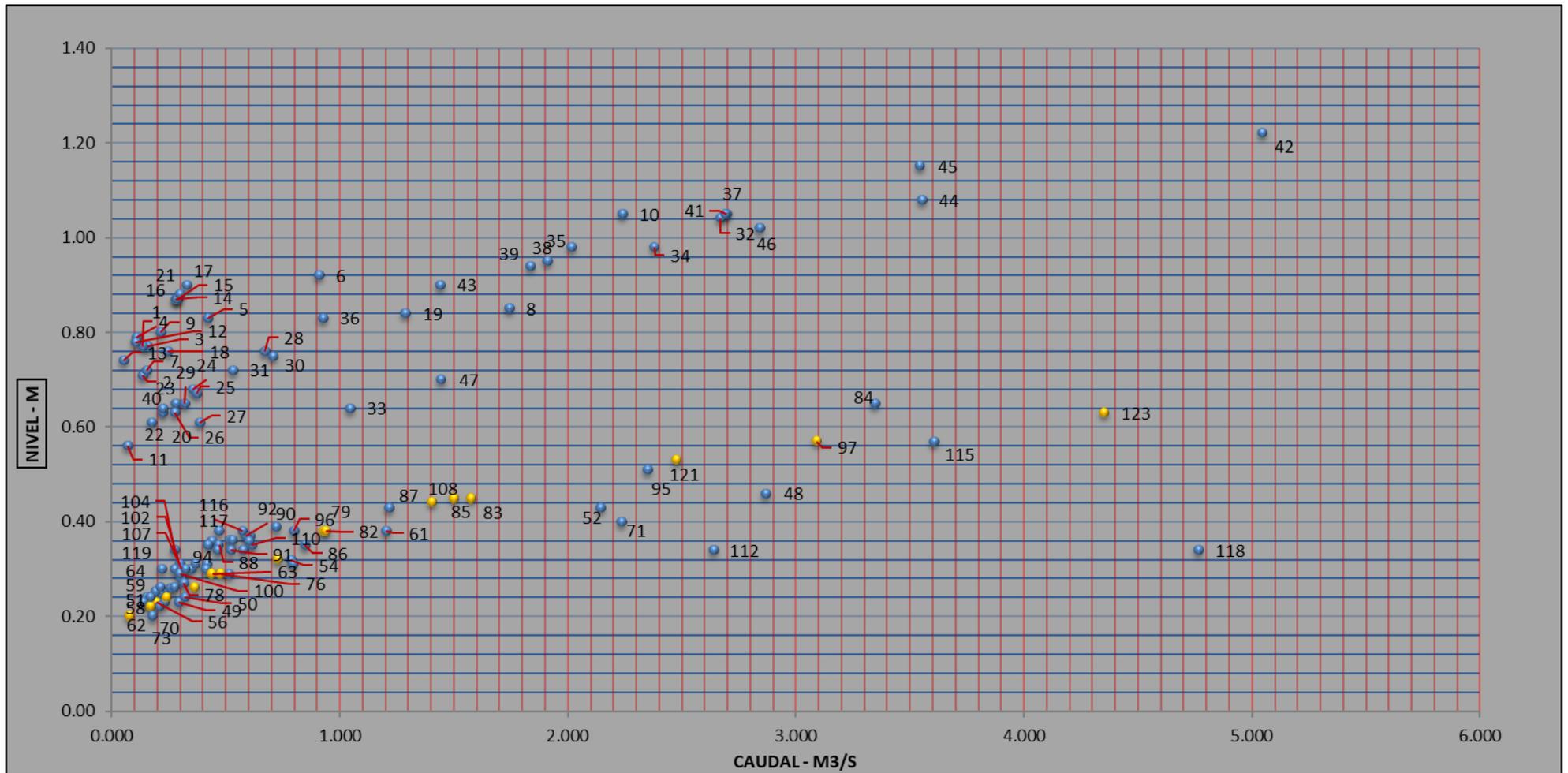
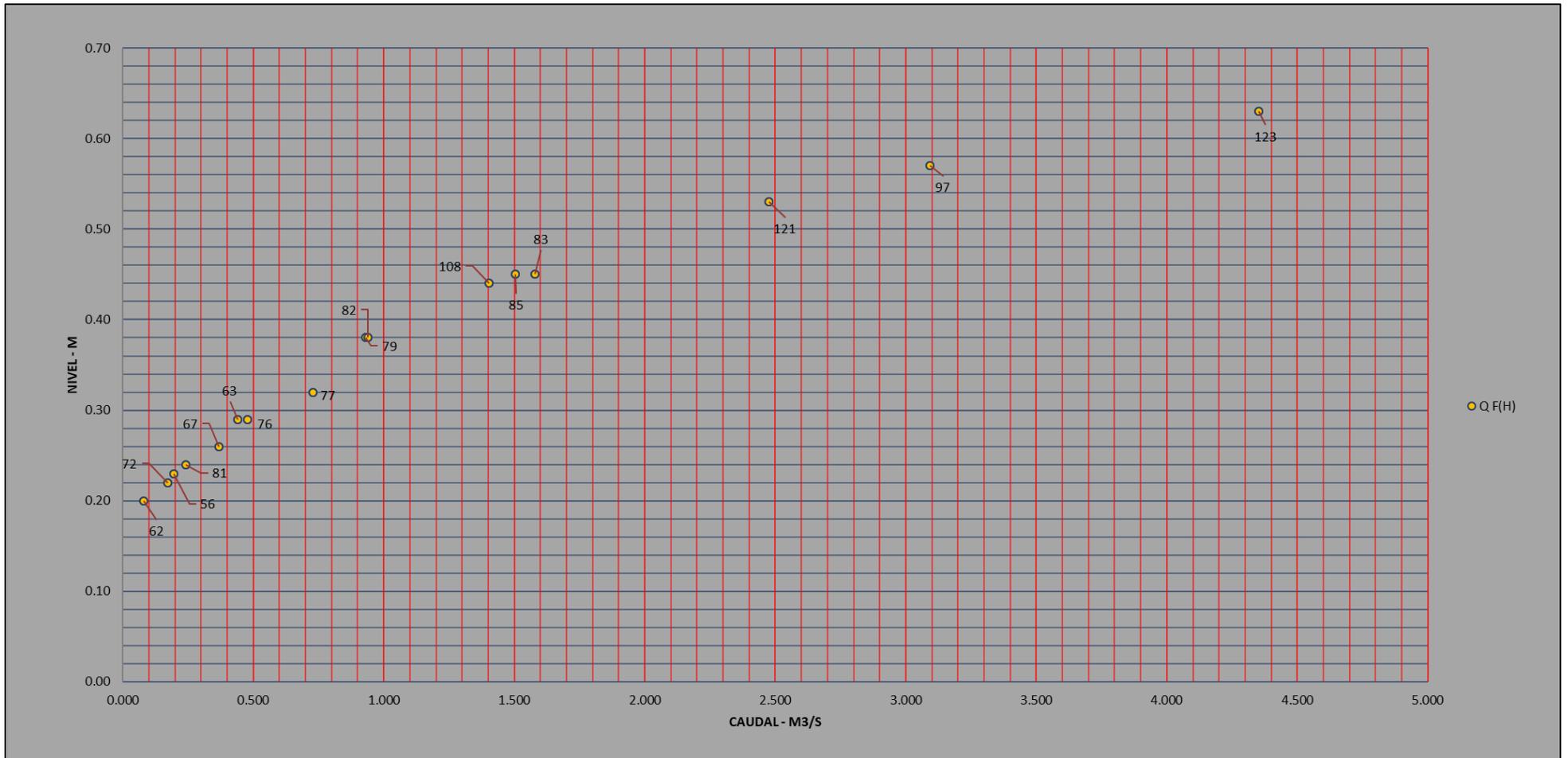


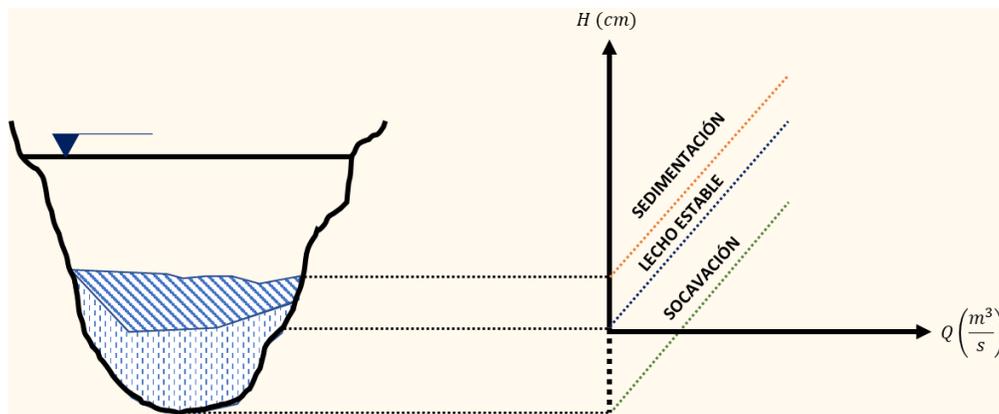
Figura 9. Detalle de la línea de tendencia propuesta para la distribución del registro histórico de aforos en la Estación Puente La Calera
Fuente: Elaboración propia



Establecida la tendencia de la curva de calibración, se procede a hacer la corrección de nivel correspondiente a los demás aforos contenidos en la tabla de resumen de aforos (Tabla 5) teniendo en cuenta los fenómenos de sedimentación y socavación; Para ello se considera que cuando existe sedimentación el nivel del fondo del río se eleva y de igual forma se aumenta la lectura del nivel del agua en la regleta o mira, por lo tanto, hay que descontar el incremento correspondientemente hasta la curva de gastos propuesta. Por otro lado, cuando existe un proceso de socavación, el nivel del fondo disminuye, por tanto, hay que aumentarlo correspondientemente hasta la curva de calibración propuesta anterior supone que Q aforado es constante. En la siguiente Figura 10 se presenta un esquema de la forma en la cual se presenta el fenómeno de sedimentación y socavación y cómo el comportamiento de la curva de gasto.

Figura 10. Dinámica curva de gastos - Procesos de sedimentación y socavación

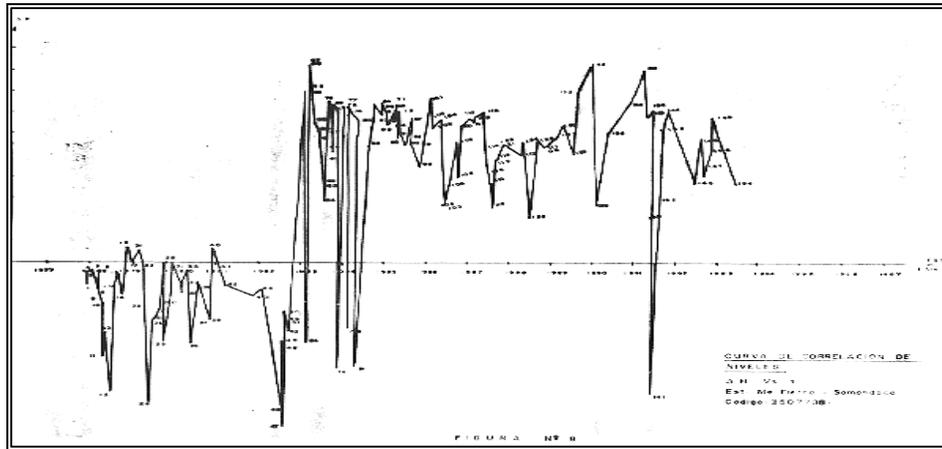
Fuente: Aforos líquidos. Abraham Salazar, 2017



Técnicamente no existe un error cuadrático, sino una ubicación arriba o debajo de los aforos dependiendo del proceso que se esté ejecutando, el cual corresponde a períodos no cíclicos pero que pueden durar meses e inclusive años. A continuación, se muestra un ciclo de socavación y sedimentación detectado en un río.

Figura 11. Procesos de sedimentación y socavación de un río

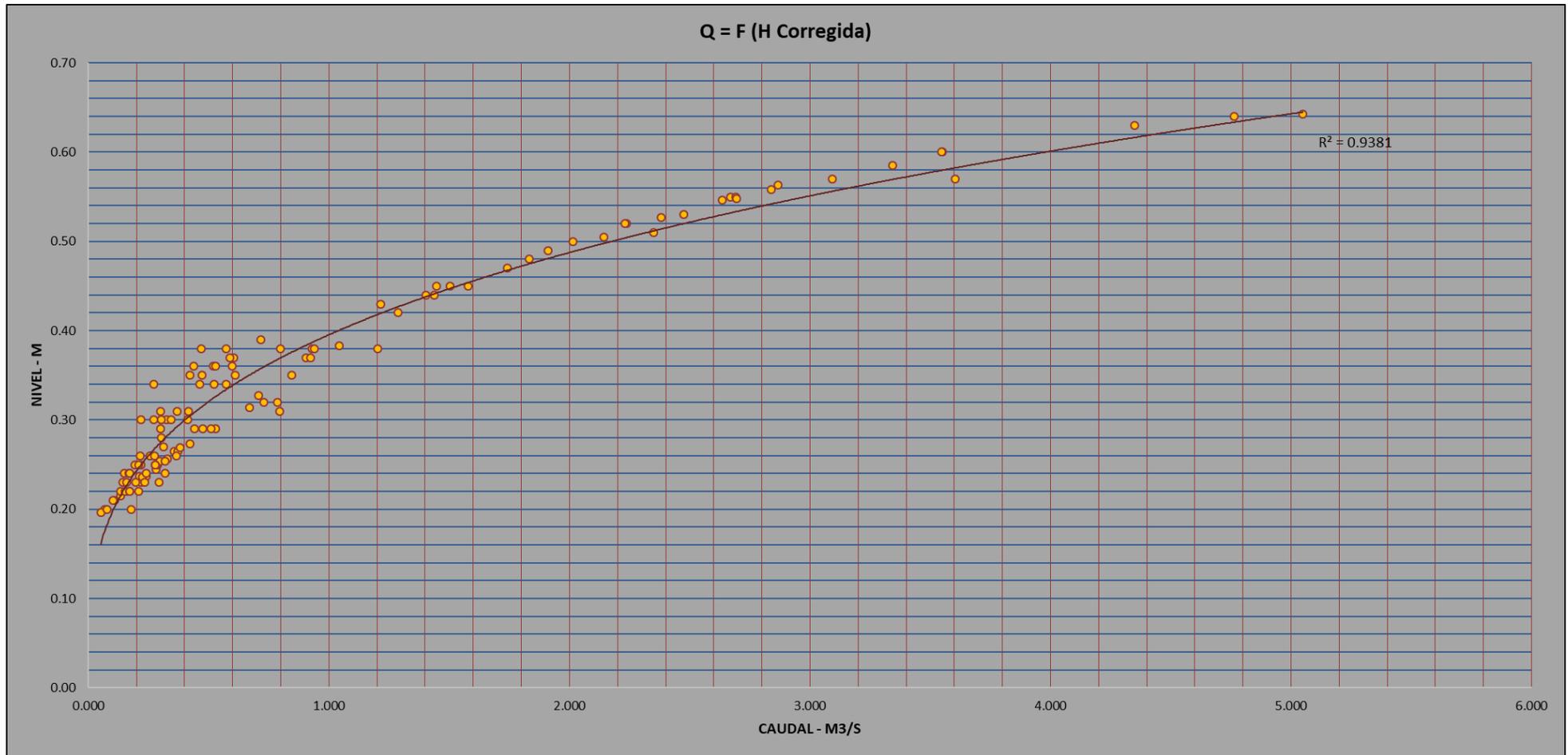
Fuente: Aforos líquidos. Abraham Salazar, 2017



Tomando aleatoriamente, y como ejemplo el dato del 22 de noviembre de 2016 se evidencia que una vez se ejecutó el aforo se estaba desarrollando un proceso de sedimentación en este sector del río, al registrarse un caudal de 3,343 m³/s con un nivel de agua de 0,65m sin cambiar el caudal, se acerca o traslada el nivel inicial hacia la curva propuesta, pasando de 0,65m a 0,59m (reducción de 6 cm). Analizando la información detalladamente se encontró situaciones imprecisas, por ejemplo, que para un mismo caudal existe más de un nivel.

Se recomienda iniciar la corrección de los niveles correspondientes a los aforos que estén más alejados tanto por encima como por debajo de la curva de gastos – calibración corregida. Realizado el ajuste con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel, se verifica que la dispersión sea menor o igual al 10%, lo que traduciéndose en un mejor ajuste espacial de los aforos para formar la curva de calibración como se presenta en la Figura 12.

Figura 12. Niveles corregidos a la curva de calibración – gastos
Fuente: Elaboración propia



En la Figura 12 se puede observar que el coeficiente de determinación refleja una distribución de ajuste menor al 10% de los datos de aforo; por lo cual una vez más se realiza la tabla de resumen de aforos donde se incluye la columna, H corregida, correspondiente al nivel ajustado; con la Tabla 10 se genera la curva de calibración propuesta.

Tabla 10. Tabla de resumen de aforos - Corrección de nivel

Fuente: Elaboración propia

Fecha	Aforo	Caudal (m ³ /s)	Nivel (m)	Área (m ²)	Ancho Sección (B)	Velocidad Media (m/s)	H Corregida
21/01/2008 14:50:00	1	0.108	0.79	0.88	5.00	0.12	0.21
11/02/2008 11:40:00	2	0.134	0.71	0.72	3.75	0.19	0.22
11/02/2008 14:00:00	3	0.155	0.77	0.98	5.10	0.16	0.22
14/03/2008 16:20:00	4	0.135	0.77	0.85	4.75	0.16	0.22
14/03/2008 17:30:00	5	0.421	0.83	2.02	6.10	0.21	0.27
11/04/2008 12:30:00	6	0.906	0.92	1.83	5.10	0.50	0.37
11/04/2008 14:30:00	7	0.153	0.72	1.63	6.00	0.09	0.22
24/12/2008 10:00:00	8	1.741	0.85	1.79	6.10	0.97	0.47
28/01/2009 13:00:00	9	0.212	0.80	0.32	1.60	0.66	0.24
17/02/2009 11:15:00	10	2.238	1.05	3.08	6.40	0.73	0.52
30/09/2009 14:25:00	11	0.069	0.56	0.92	4.80	0.08	0.20
28/10/2009 09:15:00	12	0.103	0.78	1.08	5.80	0.10	0.21
24/11/2009 08:45:00	13	0.051	0.74	0.65	4.90	0.08	0.20
23/12/2009 07:50:00	14	0.280	0.87	1.53	6.30	0.18	0.25
12/01/2010 15:15:00	15	0.288	0.87	1.55	6.30	0.19	0.25
24/02/2010 07:35:00	16	0.285	0.87	1.56	6.30	0.18	0.25
17/03/2010 07:30:00	17	0.329	0.90	1.73	6.35	0.19	0.26
22/04/2010 08:20:00	18	0.242	0.76	0.98	5.80	0.25	0.24
20/05/2010 09:00:00	19	1.287	0.84	6.32	4.50	0.20	0.42
10/06/2010 08:50:00	20	0.220	0.63	0.79	4.70	0.28	0.23
07/07/2010 07:40:00	21	0.297	0.88	1.32	5.95	0.23	0.25
11/08/2010 07:25:00	22	0.173	0.61	0.69	4.70	0.25	0.22
15/09/2010 07:35:00	23	0.278	0.65	0.90	4.70	0.31	0.25
12/10/2010 08:10:00	24	0.356	0.68	1.02	4.70	0.35	0.27
19/11/2010 14:15:00	25	0.373	0.67	1.24	5.00	0.30	0.27
17/12/2010 14:50:00	26	0.277	0.63	0.97	4.80	0.29	0.25
21/01/2011 13:15:00	27	0.383	0.61	0.67	4.10	0.58	0.27
18/02/2011 11:20:00	28	0.670	0.76	1.50	5.20	0.45	0.31
18/03/2011 10:35:00	29	0.319	0.65	1.12	5.00	0.29	0.25
17/04/2011 09:25:00	30	0.707	0.75	1.72	6.00	0.41	0.33
27/05/2011 09:40:00	31	0.528	0.72	1.36	4.50	0.39	0.29
27/07/2011 13:50:00	32	2.669	1.04	3.08	6.50	0.87	0.55
26/08/2011 13:25:00	33	1.042	0.64	1.32	4.60	0.79	0.38
30/09/2011 17:15:00	34	2.380	0.98	2.73	6.50	0.87	0.53
28/10/2011 16:00:00	35	2.016	0.98	3.02	6.40	0.67	0.50
02/12/2011 16:00:00	36	0.923	0.83	2.14	5.80	0.43	0.37
13/12/2011 09:10:00	37	2.692	1.05	3.11	6.50	0.87	0.55
30/12/2011 16:00:00	38	1.910	0.95	2.87	6.40	0.67	0.49
27/01/2012 16:00:00	39	1.832	0.94	2.79	6.20	0.66	0.48
28/02/2012 15:45:00	40	0.224	0.64	1.03	4.20	0.22	0.24
27/03/2012 16:00:00	41	2.694	1.05	3.11	6.50	0.87	0.55

Fecha	Aforo	Caudal (m ³ /s)	Nivel (m)	Área (m ²)	Ancho Sección (B)	Velocidad Media (m/s)	H Corregida
24/05/2012 13:00:00	42	5.048	1.22	4.53	7.00	1.11	0.64
27/06/2012 13:15:00	43	1.439	0.90	2.42	6.00	0.60	0.44
26/07/2012 13:10:00	44	3.551	1.08	3.85	5.90	0.92	0.60
28/08/2012 12:30:00	45	3.547	1.15	4.54	7.50	0.78	0.60
25/09/2012 10:00:00	46	2.839	1.02	2.52	4.60	1.13	0.56
28/11/2012 17:20:00	47	1.447	0.70	2.45	6.80	0.59	0.45
04/12/2012 13:15:00	48	2.868	0.46	2.34	8.30	1.23	0.56
26/02/2013 15:00:00	49	0.294	0.23	1.57	5.70	0.19	0.23
27/03/2013 14:30:00	50	0.319	0.24	1.49	6.30	0.21	0.24
04/04/2013 13:00:00	51	0.142	0.23	0.27	2.30	0.53	0.23
28/05/2013 14:00:00	52	2.143	0.43	2.77	7.00	0.77	0.51
02/10/2013 14:30:00	53	0.150	0.24	0.26	2.30	0.59	0.24
04/10/2013 13:00:00	54	0.786	0.32	1.70	7.10	0.46	0.32
10/01/2014 15:45:00	55	0.303	0.28	0.40	2.40	0.75	0.28
04/02/2014 09:40:00	56	0.196	0.23	0.57	4.50	0.34	0.23
04/03/2014 09:40:00	57	0.233	0.23	0.93	5.20	0.25	0.23
01/04/2014 09:40:00	58	0.160	0.23	0.78	5.10	0.20	0.23
06/05/2014 09:40:00	59	0.168	0.24	0.44	2.70	0.38	0.24
04/06/2014 09:35:00	60	0.220	0.25	0.71	4.80	0.31	0.25
02/07/2014 09:35:00	61	1.203	0.38	1.78	7.00	0.68	0.38
29/07/2014 09:35:00	62	0.079	0.20	0.29	2.50	0.28	0.20
26/08/2014 09:35:00	63	0.440	0.29	1.16	6.20	0.38	0.29
23/09/2014 09:35:00	64	0.192	0.25	0.71	4.50	0.27	0.25
21/10/2014 09:40:00	65	0.417	0.31	1.10	5.60	0.38	0.31
05/03/2015 09:35:00	66	0.511	0.29	1.39	6.70	0.37	0.29
31/03/2015 10:10:00	67	0.367	0.26	0.75	5.20	0.49	0.26
27/04/2015 16:20:00	68	0.257	0.26	0.69	4.60	0.38	0.26
23/06/2015 09:35:00	69	0.208	0.25	0.60	4.50	0.35	0.25
10/08/2015 09:20:00	70	0.210	0.22	0.59	4.50	0.36	0.22
08/09/2015 09:35:00	71	2.232	0.40	1.91	6.50	1.17	0.52
10/10/2015 09:35:00	72	0.173	0.22	0.84	5.80	0.21	0.22
03/11/2015 09:35:00	73	0.179	0.20	0.57	5.40	0.31	0.20
23/02/2016 10:30:00	74	0.276	0.26	1.76	5.50	0.16	0.26
29/03/2016 10:50:00	75	0.215	0.26	1.17	6.00	0.18	0.26
12/04/2016 12:30:00	76	0.477	0.29	1.19	6.80	0.40	0.29
11/05/2016 11:30:00	77	0.730	0.32	1.57	6.20	0.46	0.32
10/06/2016 15:10:00	78	0.313	0.27	1.53	6.00	0.21	0.27
12/07/2016 11:45:00	79	0.931	0.38	1.62	6.60	0.58	0.38
09/08/2016 08:40:00	80	0.173	0.24	1.01	4.60	0.17	0.24
06/09/2016 09:45:00	81	0.242	0.24	0.96	4.60	0.25	0.24
04/10/2016 09:35:00	82	0.940	0.38	2.17	7.10	0.43	0.38
02/11/2016 10:25:00	83	1.579	0.45	2.52	7.50	0.63	0.45
22/11/2016 10:30:00	84	3.343	0.65	3.37	7.20	0.99	0.59
30/11/2016 09:35:00	85	1.504	0.45	2.29	7.10	0.66	0.45
03/01/2017 09:25:00	86	0.844	0.35	1.60	6.30	0.53	0.35
31/01/2017 09:25:00	87	1.216	0.43	2.01	6.60	0.61	0.43
12/09/2017 10:35:00	88	0.471	0.35	1.52	6.50	0.31	0.35
10/10/2017 10:00:00	89	0.603	0.37	1.71	6.90	0.35	0.37
07/11/2017 09:40:00	90	0.717	0.39	1.80	7.00	0.40	0.39
06/12/2017 14:25:00	91	0.521	0.34	1.51	6.70	0.35	0.34
16/01/2018 09:35:00	92	0.588	0.37	1.62	6.80	0.36	0.37
13/02/2018 09:35:00	93	0.519	0.36	1.65	7.00	0.32	0.36

Fecha	Aforo	Caudal (m ³ /s)	Nivel (m)	Área (m ²)	Ancho Sección (B)	Velocidad Media (m/s)	H Corregida
13/03/2018 09:30:00	94	0.368	0.31	1.21	6.40	0.30	0.31
10/04/2018 09:20:00	95	2.349	0.51	3.01	7.70	0.78	0.51
08/05/2018 08:35:00	96	0.799	0.38	1.87	7.10	0.43	0.38
15/06/2018 09:35:00	97	3.092	0.57	3.30	7.80	0.94	0.57
14/08/2018 13:40:00	98	0.437	0.36	1.58	7.00	0.28	0.36
28/02/2019 08:45:00	99	0.304	0.30	1.40	6.90	0.22	0.30
19/03/2019 08:15:00	100	0.301	0.29	1.33	6.80	0.23	0.29
09/04/2019 08:45:00	101	0.326	0.30	1.40	6.70	0.23	0.30
14/05/2019 09:15:00	102	0.299	0.31	1.24	6.70	0.24	0.31
11/06/2019 09:00:00	103	0.344	0.30	1.70	5.30	0.20	0.30
10/07/2019 07:00:00	104	0.273	0.34	0.99	6.30	0.28	0.34
15/08/2019 13:00:00	105	0.273	0.30	1.31	5.50	0.21	0.30
03/09/2019 11:40:00	106	0.412	0.30	1.25	6.80	0.33	0.30
02/10/2019 08:35:00	107	0.304	0.30	1.08	6.00	0.28	0.30
05/11/2019 14:50:00	108	1.404	0.44	1.98	7.80	0.71	0.44
03/12/2019 14:20:00	109	0.574	0.34	1.40	6.30	0.41	0.34
09/01/2020 09:40:00	110	0.611	0.35	1.52	6.50	0.40	0.35
04/02/2020 14:20:00	111	0.598	0.36	1.58	5.50	0.38	0.36
03/03/2020 14:00:00	112	2.636	0.34	8.92	5.50	0.30	0.55
09/06/2020 14:30:00	113	0.422	0.35	1.81	5.15	0.23	0.35
07/07/2020 12:20:00	114	0.464	0.34	1.96	5.40	0.24	0.34
13/07/2020 10:00:00	115	3.603	0.57	3.45	5.50	1.04	0.57
11/08/2020 14:00:00	116	0.574	0.38	2.00	5.60	0.29	0.38
14/10/2020 12:30:00	117	0.530	0.36	1.94	6.20	0.27	0.36
10/11/2020 15:10:00	118	4.764	0.34	16.03	6.50	0.30	0.64
19/01/2021 10:00:00	119	0.219	0.30	1.20	5.00	0.18	0.30
16/02/2021 17:30:00	120	0.470	0.38	1.17	5.20	0.40	0.38
24/03/2021 07:44:00	121	2.476	0.53	2.89	8.10	0.86	0.53
21/04/2021 16:26:00	122	0.795	0.31	1.37	7.00	0.58	0.31
19/05/2021 07:56:00	123	4.351	0.63	4.06	9.30	1.07	0.63

Una de las formas de corroborar la veracidad de los caudales registrados por una estación hidrológica, es establecer una relación de caudales con otras estaciones ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la estación de interés previo a una corrección de niveles para eliminar o reducir los problemas de su propia descalibración. Para el caso específico de estudio se encuentra aguas arriba a 4,20Km la estación hidrológica El Tambor, la cual no posee afluentes importantes entre ellas, por lo que los aportes laterales de agua son mínimos.

En la siguiente tabla se comparan los caudales medios mensuales -y periodos homogéneos entre las dos estaciones, hallándose valores similares (se resaltan en amarillo en la), los cuales no superan un 25% entre el caudal descargado en el embalse San Rafael, registrado en la estación hidrológica El Tambor, respecto al caudal registrado aguas abajo en la estación Puente La Calera. Para los demás

caudales, la diferencia entre los valores es mucho mayor, por lo que se evidencia una discrepancia entre estaciones.

Tabla 11. Comparativo de caudales medios mensuales

Fuente: Elaboración propia con datos de la estación El Tambor y Puente La Calera. (Consultoría Teusaca, 2020)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2004	0.35	0.33	0.36	0.27	0.16	0.13	0.26	0.37	0.37	0.21	0.20	0.17	0.27
2004													
2005	0.39	0.41	0.41	0.27	0.27	0.26	0.23	0.21	0.20	0.20	0.20	0.14	0.27
2005													
2006	0.14	0.13	0.14	0.15	0.14	0.14	0.33	0.19	0.20	0.09	0.22	0.22	0.17
2006													
2007	0.24	0.24	0.25	0.29	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23
2007													
2008	0.22	0.22	0.24	0.30	0.22	0.85	1.45	1.95	2.49	1.71	0.74	0.22	0.88
2008													
2009	0.76	2.24	1.26	1.82	1.44	0.30	0.22	0.22	0.43	0.22	0.22	0.34	0.79
2009	2.66	4.82	3.56	11.05	5.13	0.23	0.20	0.20	0.63	0.26	0.10	0.36	2.43
2010	0.35	0.35	0.35	0.31	0.47	0.52	1.11	0.62	0.22	0.66	0.42	0.22	0.47
2010	1.02	0.98	1.16	1.07	1.27	0.59	1.19	0.56	0.27	0.67	0.52	0.23	0.79
2011	0.22	1.91	0.93	0.25	0.22	2.52	3.50	0.39	0.43	1.93	1.13	2.27	1.31
2011	0.21	1.89	1.49	2.65	0.48	2.18	2.72	0.56	0.42	1.52	1.46	3.48	1.59
2012	2.63	3.66	0.84	2.16	4.49	1.24	3.54	5.21	3.17	2.94	2.90	2.61	2.95
2012	1.41	2.64	0.68	4.78	3.75	0.85	3.47	3.99	1.61	4.18	0.52	0.08	2.33
2013	1.39	0.44	0.50	0.43	1.65	0.26	0.22	1.10	0.22	0.24	2.24	2.01	0.89
2013	0.55	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.09	0.05	0.06
2014	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22	0.65	0.90	0.31	0.22	0.63	2.44	1.79	0.67
2014	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.07	0.04	0.02
2015	0.68	0.97	1.00	0.22	0.41	1.77	1.07	0.59	0.71	0.22	0.22	0.22	0.67
2015	0.50	0.48	0.50		0.40	1.43	0.96	0.61	0.69	0.12	0.19	0.12	0.55
2016	0.27	0.35	0.35	0.90	0.53	0.22	0.47	0.41	0.61	1.11	2.41	1.68	0.78
2016	0.01	0.18	0.37	0.58	0.52	0.36	0.85	0.71	0.95	1.48	2.55	1.40	0.83
2017	1.11	1.50	1.82	1.90	2.33	1.78	0.83	0.34	0.22	0.44	0.46	0.32	1.09
2017	1.22	1.99	2.50	2.43	2.73	2.41	1.33	0.84	0.79	1.59	1.49	1.20	1.71
2018	0.44	0.22	0.51	1.01	1.11	2.96	2.39	0.22	0.22	0.55	0.22	0.22	0.84
2018	1.32	1.02	1.10	1.51	1.71	2.83	2.52	1.12	1.08	1.13	0.95	0.85	1.43
2019	0.52	0.35	0.25	0.61	0.28	0.22	0.67						0.41
2019	0.82	0.63	0.94	0.93	0.82	1.09	1.77	0.82	0.70	0.76	1.25	1.09	0.97
MED	0.62	0.85	0.59	0.69	0.89	0.88	1.09	0.82	0.66	0.76	0.95	0.84	0.80
MED	0.88	1.33	1.12	2.27	1.53	1.09	1.37	0.86	0.65	1.06	0.83	0.81	1.15
MAX	2.63	3.66	1.82	2.16	4.49	2.96	3.54	5.21	3.17	2.94	2.90	2.61	5.21
MIN	0.14	0.13	0.14	0.15	0.14	0.13	0.22	0.19	0.20	0.09	0.20	0.14	0.09

Información Qmed estación Puente La Calera - CAR - Aguas abajo
 Información Qmed estación El Tambor - EAAB - Descarga de Fondo

Existe otra estación hidrológica ubicada aguas abajo de la estación Puente La Calera, denominada La Cabaña. Para llevar a un detalle más verificable, se realiza un exhaustivo análisis con los caudales medios diarios entre las tres estaciones, pudiéndose comparar hasta el comportamiento hidrológico con la lluvia diaria registrada en otra estación, para el caso se podría comparar con la información de la estación ubicada en La Calera, Planta Wiesner, operada por la EAAB.

Como se menciona en dentro de la Información, se verificó la similitud entre las áreas de drenaje donde se localizan las estaciones hidrológicas, se analizaron los caudales medios diarios entre las tres estaciones (El Tambor, Puente La Calera y La Cabaña), encontrándose que entre el 19 al 22 de enero de 2009, se presentó un aumento de caudal solo en la estación Puente La Calera- como si hubiera llovido aguas abajo de la estación El Tambor-, y registrado por la estación Puente La Calera y desviado o desaparecido antes de transitar por la estación La Cabaña, sin mencionar que estos mismos caudales son entre dos y siete veces mayores al caudal máximo registrado históricamente en la estación Puente La Calera. Esta inconsistencia se repite como se muestra en los meses de marzo, abril y mayo del mismo año, pero también se presenta años posteriores no relacionados en este estudio.

Tabla 12. Comparativo caudales medios - Estaciones sucesivas Rio Teusacá
Fuente: Elaboración propia con información suministrada por la CAR - EAAB

FECHA	ELTAMBOR	PUENTE LA CALERA	LA CABAÑA	FECHA	ELTAMBOR	PUENTE LA CALERA	LA CABAÑA
19/01/2009	4.341	20.878	4.398	1/05/2009	2.93	10.282	3.234
20/01/2009	3.09	16.325	4.665	2/05/2009	2.932	10.282	3.327
21/01/2009	4.266	16.325	4.197	3/05/2009	2.93	10.282	3.253
22/01/2009	2.3	16.325	3.771	4/05/2009	2.906	10.282	5.255
31/03/2009	2.59	20.878	2.64	5/05/2009	2.900	24.610	10.84
1/04/2009	4.00	33.534	4.812	7/05/2009	2.87	10.282	7.868
2/04/2009	4.04	33.534	15.614	8/05/2009	2.922	10.282	6.501
3/04/2009	3.799	36.236	10.983	9/05/2009	2.984	10.282	5.65
4/04/2009	3.953	33.534	8.352	10/05/2009	2.92	10.282	5.376
5/04/2009	3.936	33.534	6.766	11/05/2009	2.949	10.282	5.158
6/04/2009	3.912	36.236	5.995	19/04/2012	0.41	20.982	7.028
7/04/2009	3.817	36.236	5.76	20/04/2012	0.97	37.042	5.448
8/04/2009	3.871	33.534	5.932	21/04/2012	0.52	19.731	8.575
9/04/2009	3.458	25.431	4.494	20/10/2012	6.5	28.375	8.82

Aforos complementarios

Se pueden realizar aforos complementarios para verificar la exactitud o presión de los valores obtenidos respecto a la curva de calibración establecida, demostrando cómo se puede determinar el comportamiento de la dispersión de un dato obtenido en campo al compararlo con una curva de gastos ajustada. Nótese que de los ocho aforos realizados a finales del año 2021 y principio del año 2022, se hizo ajuste de nivel únicamente de dos datos.

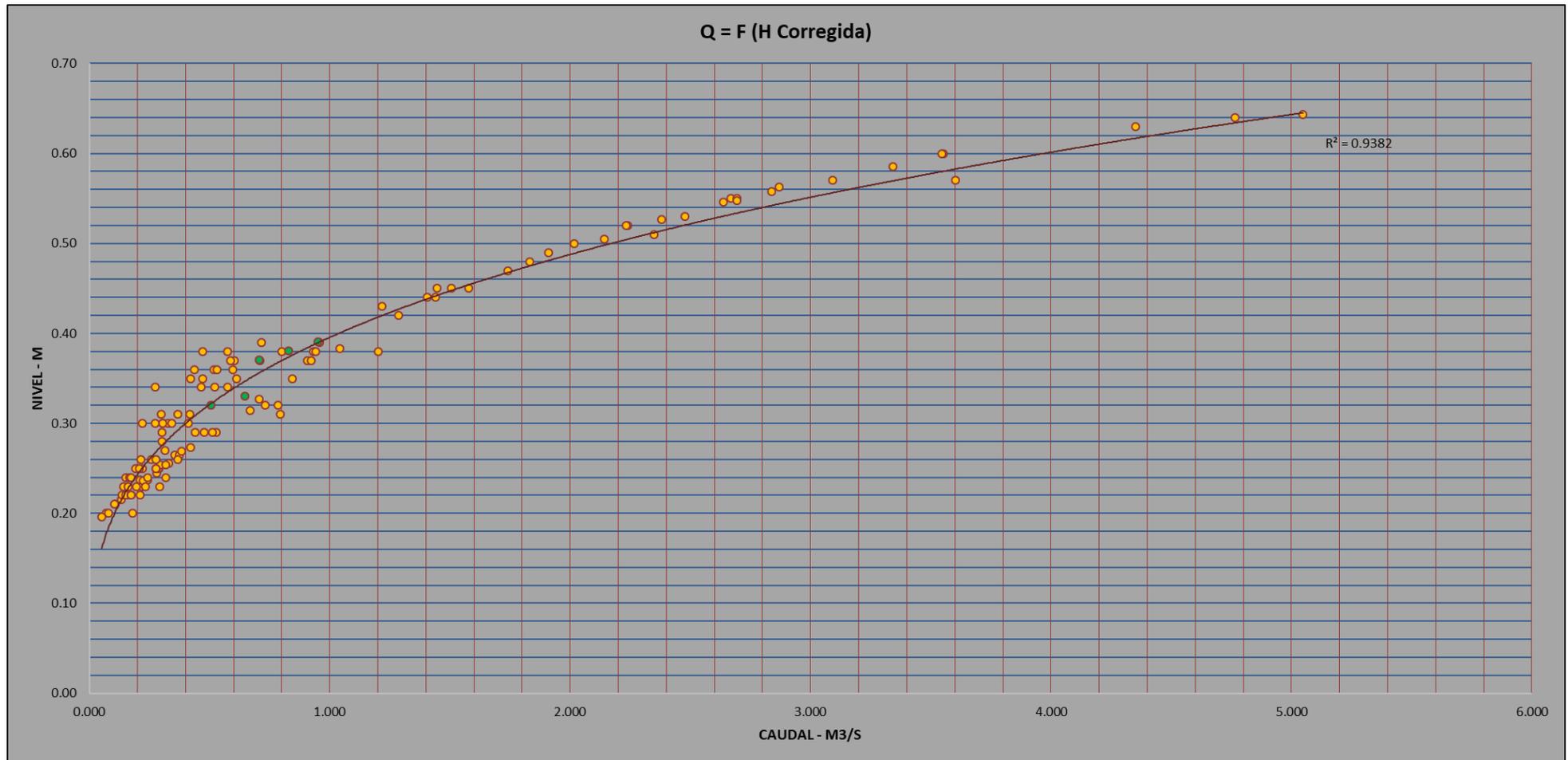
Tabla 13. Registro de aforos y corrección de nivel
Fuente: Elaboración propia

FECHA	AFORO	CAUDAL (m ³ /s)	NIVEL (m)	AREA (m ²)	ANCHO SECCIÓN (B)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	H Corregida
02/10/2021 15:20:00	1	0.830	0.42	2.25	5.80	0.37	0.38
23/10/2021 15:45:00	2	0.709	0.37	2.01	5.80	0.35	0.37
14/11/2021 14:35:00	3	0.648	0.33	1.86	6.70	0.35	0.33
22/11/2021 15:15:00	4	0.709	0.37	2.19	6.40	0.33	0.37
13/12/2021 15:20:00	5	0.506	0.32	1.91	6.70	0.27	0.32
16/01/2022 14:30:00	6	0.951	0.39	2.28	6.60	0.42	0.39
20/02/2022 15:45:00	7	0.956	0.42	2.42	6.50	0.40	0.39

Para generar confianza a la metodología propuesta en este trabajo, se realizaron siete campañas de aforo con el objetivo de localizar los datos obtenidos dentro de esta curva de calibración que se podría definir como vigente al confirmarse un ajuste adecuado de los datos obtenidos en campo dentro de la curva de calibración obtenida, de tal forma que se brinda validez a la metodología.

Además de lo anterior, se puede considerar que en la mayor parte del tiempo en el flujo de este cuerpo de agua transita un caudal de hasta 1,00 m³/s a un nivel no mayor a los 0,40m.

Tabla 14. Distribución aforos complementarios – curva de gastos
Fuente: Elaboración propia



5.4. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Bajo la experticia del profesional se procede a ingresar los primeros parámetros al modelo hidráulico, los resultados arrojados corresponderán a la curva de gastos teórica, seguidamente se superpone la curva de gastos real con la curva de gastos teórica para determinar la relación de su tendencia, buscando una mayor exactitud, o buscando un mayor acercamiento de los datos simulados hacia los datos observados, esto modificando bajo el criterio profesional parámetros como el factor de rugosidad y pendiente del lecho por método de prueba y error, tal como se expuesto anteriormente. Por último, se presentan los resultados de la modelación hidráulica haciendo uso del modelo HYMO 10 y HECRAS.

Resultados con el modelo hidráulico HYMO 10

Para establecer la mejor exactitud entre los resultados arrojados por el modelo HYMO 10, con respecto a la curva de gastos real fue necesario realizar cuatro calibraciones (**Anexo E**); de este modo se logró que los resultados de la simulación logran acercarse lo mejor posible a la tendencia de la curva de calibración establecida.

Los datos o puntos que se muestran en las Figura 13 en color amarillo corresponden a la curva de gasto real, caudales aforados ajustados, mientras que los datos o puntos de color rojo pertenecen a la curva de gastos teórica resultados del modelo HYMO 10. Los resultados arrojados por el modelo fueron producto de una relación de coeficientes de rugosidad η que se muestran a continuación.

Tabla 15. Resultados obtenidos con el modelo HYMO 10
Fuente: Elaboración propia

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD - η			CURVA DE GASTOS
MARGEN DERECHO	LECHO	MARGEN IZQUIERDO	MODELO HYMO 10
0,055	0,035	0.040	Simulación No. 1
0,049	0,036	0,040	Simulación No. 2
0,037	0,032	0,038	Simulación No. 3
0,032	0,020	0,035	Simulación No. 4

Figura 13. Primera calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de Calibración
Fuente: Elaboración propia

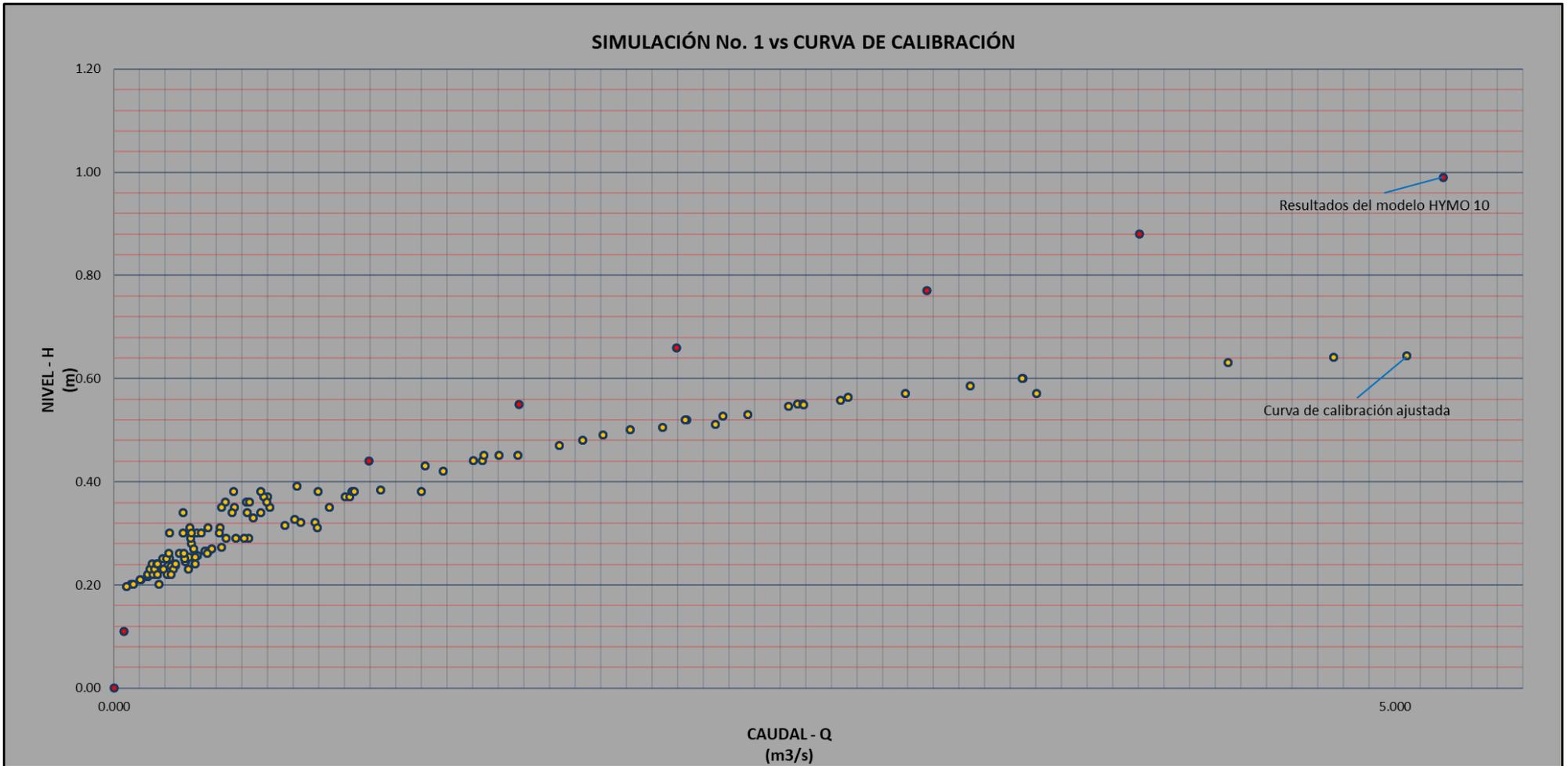


Figura 14. Segunda calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de Calibración
Fuente: Elaboración propia

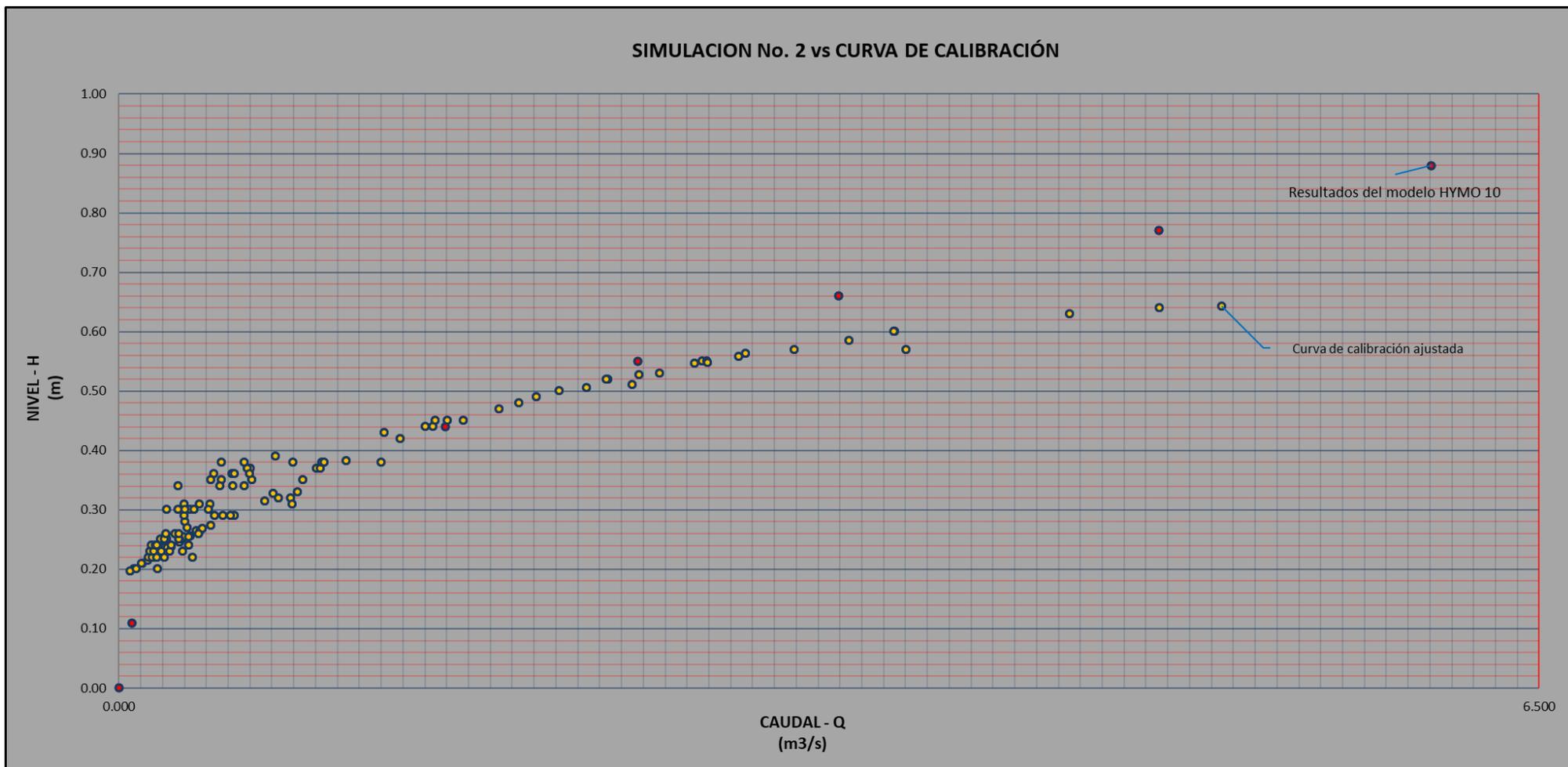


Figura 15. Tercera calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de calibración
Fuente: Elaboración propia

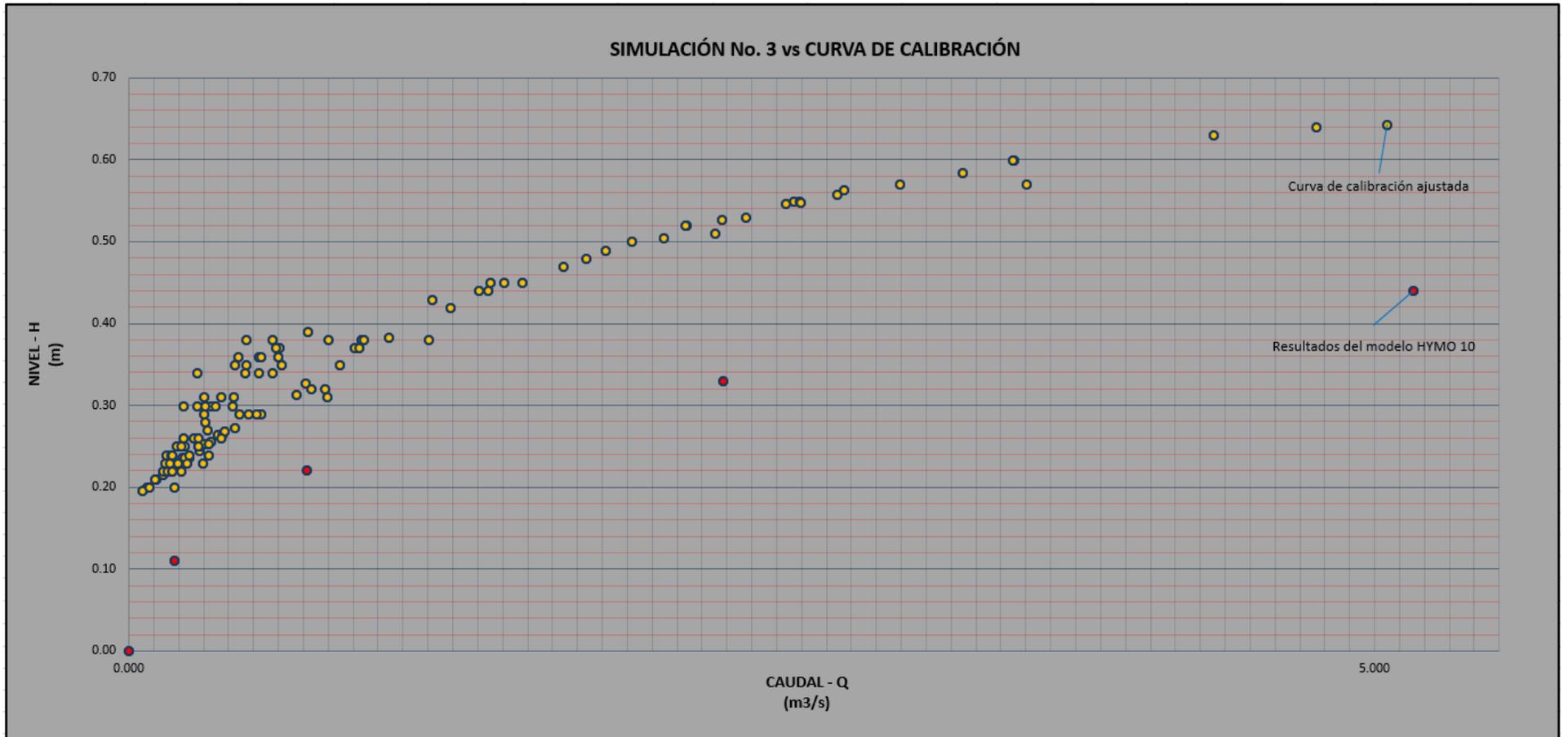
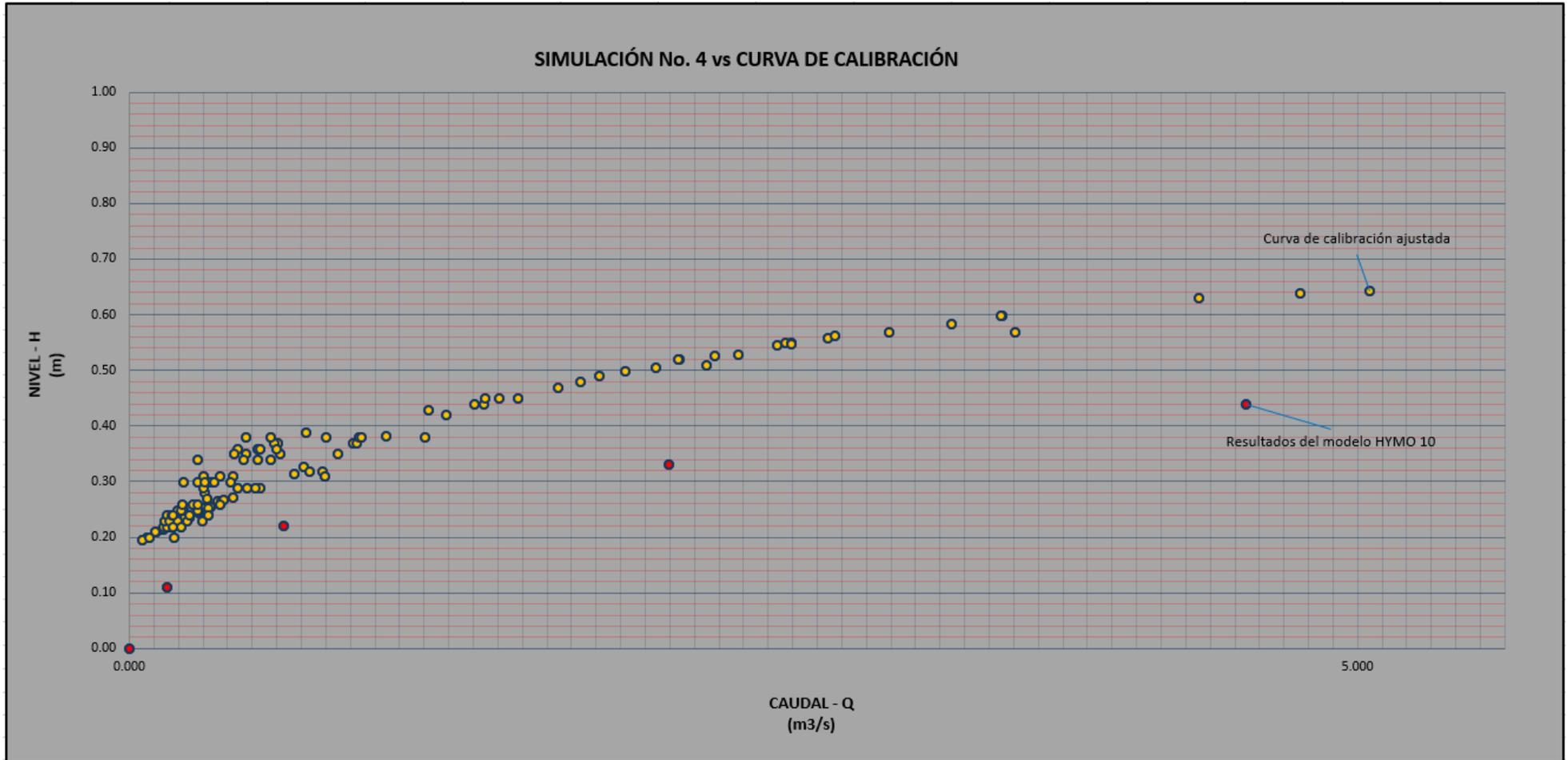


Figura 16. Cuarta calibración y resultado de la simulación HYMO 10 vs Curva de calibración
Fuente: Elaboración propia



Resultados con el modelo HEC RAS

De acuerdo con la Figura 5, el caudal máximo aforado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR en la Estación Puente la Calera fue de 5,05 m³/s obtenido el 24 de mayo de 2012.

Es así como se presenta en la Figura 17, registrando con puntos de color amarillo la curva de calibración con el ajuste de la serie de datos y con puntos de color verde los resultados del modelo HEC RAS generados por el ajuste del coeficiente de rugosidad con flujo uniforme. Este ajuste, mediante el método de prueba y error busca acercar los resultados del modelo a la curva de calibración. Para el caso en estudio, busca establecer una cota o nivel confiable para el caudal máximo aforado históricamente en la sección de la estación Puente La Calera; este mismo procedimiento se puede realizar con el objetivo de determinar cotas o niveles para diferentes periodos de retorno. Los resultados arrojados por el modelo se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Niveles obtenidos como resultado del modelo HEC RAS
Fuente: Elaboración propia con datos del modelo HEC RAS

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD - η			RESULTADOS HEC RAS
MARGEN DERECHO	LECHO	MARGEN IZQUIERDO	NIVELES OBTENIDOS
0,049	0,036	0,040	0,76
0,037	0,032	0,038	0,74
0,032	0,020	0,035	0,71

Como se mencionó, en la curva de calibración obtenida mediante la metodología propuesta, se puede detallar un nivel de 0,64 m para el caudal máximo histórico aforado en la estación Puente La Calera de 5,05 m³/s; los demás puntos corresponden al registro de los aforos que se ajustaron y que dan lugar a esta curva de tendencia.

Por otro lado, los tres niveles obtenidos como resultado de la modelación son muy próximos entre ellos y entre el nivel generado por la curva de calibración propuesta. Este primer y único ejercicio práctico dentro de esta investigación permite contemplar la posibilidad de usar esta metodología que pretende validar y confiar en la información obtenida en campo, para que, mediante la calibración de los modelos hídricos e hidráulicos, se logren resultados más ajustados a los datos

obtenidos en campo. Los resultados arrojados por la simulación con el modelo HEC-RAS se adjuntan (Anexo F) a este trabajo.

Cuando los resultados de una modelación hidráulica, niveles o cotas no presenten mayor diferencia entre sí, o no presenten mayor diferencia con respecto al nivel señalado por la curva de calibración obtenida, se podría tomar como dato para diseño el mayor nivel generado por la modelación. Cuando estos resultados evidencien diferencias técnicamente considerables, el profesional deberá tomar decisiones bajo el contexto o la necesidad para la cual se requiera el estudio o el diseño.

5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

Si se tomara el registro histórico de los datos de la estación Puente La Calera sin un análisis hidrológico previo para generar la curva de la calibración, seguramente se obtendría la Figura 18 que se muestra a continuación o posiblemente cualquier otro tipo de tendencia inexacta en la curva que pasaría desapercibida para ser usada en cualquier diseño o estudio hidrotécnico. Lo anterior se confirma al verificar el valor mínimo del r cuadrado ($r^2 = 21\%$), sugiriendo que existe una mínima relación entre los datos de la gráfica.

Si por el contrario se representan en conjunto los resultados de la curva de calibración ajustada mediante la metodología propuesta en este trabajo y el resultado del modelo con el que se obtuvo la menor dispersión en relación con la curva de calibración ajustada y los resultados simulados por el modelo HEC RAS, todos con una mínima dispersión hacia la curva de calibración ajustada, se obtiene la Figura 19.

La Figura 19 permite entender que, con el ajuste de los datos observados, el caudal máximo registrado por la estación Puente La Calera de $5,05 \text{ m}^3/\text{s}$ y requiere un nivel de $0,64 \text{ m}$ para su tránsito; este mismo ejercicio se puede realizar para diferentes periodos de retornos relacionando los resultados con la curva de tendencia propuesta.

Figura 17. Resultado de la simulación – HEC-RAS
Fuente: Elaboración propia

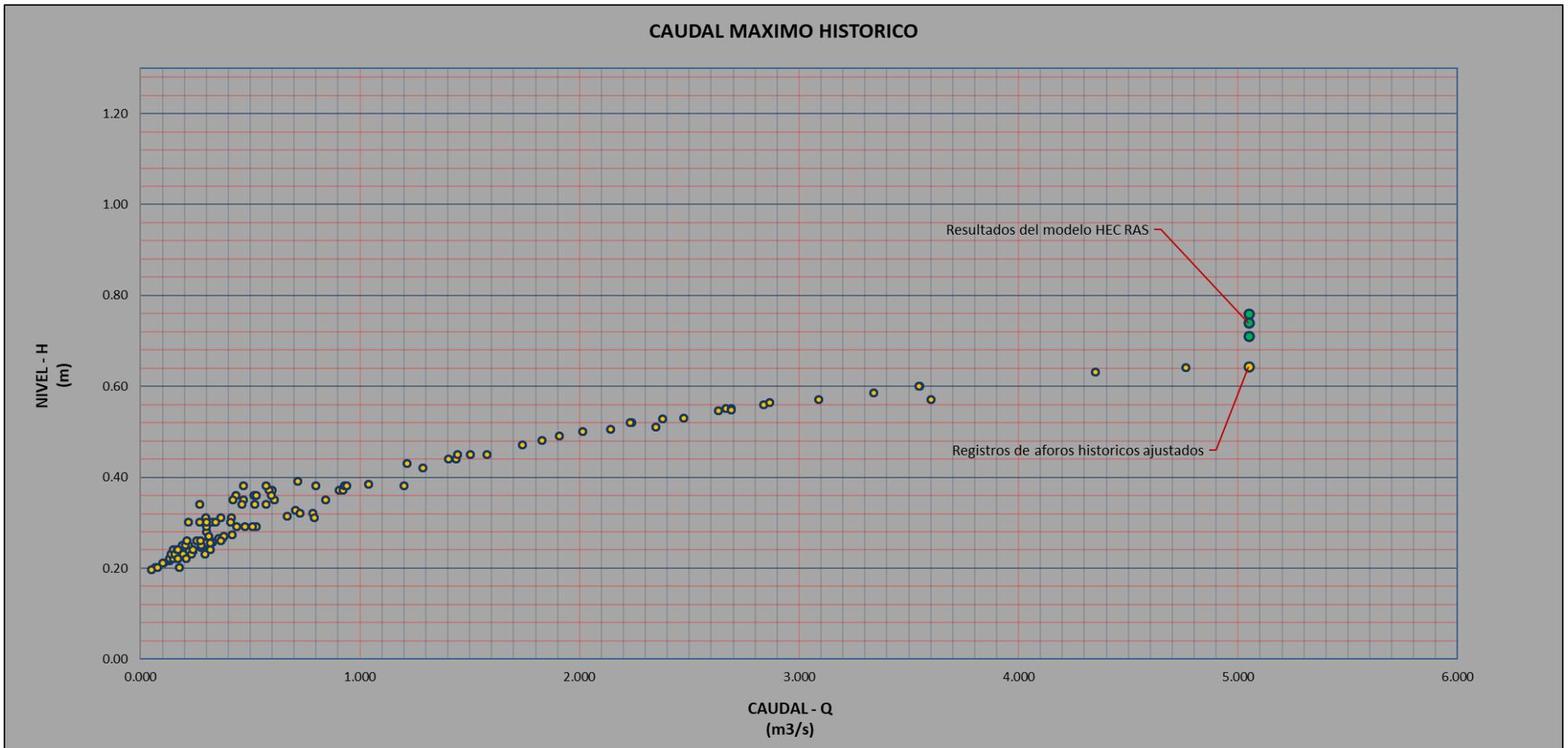


Figura 18. Curva de calibración generada sin ajuste de datos
Fuente: Elaboración propia

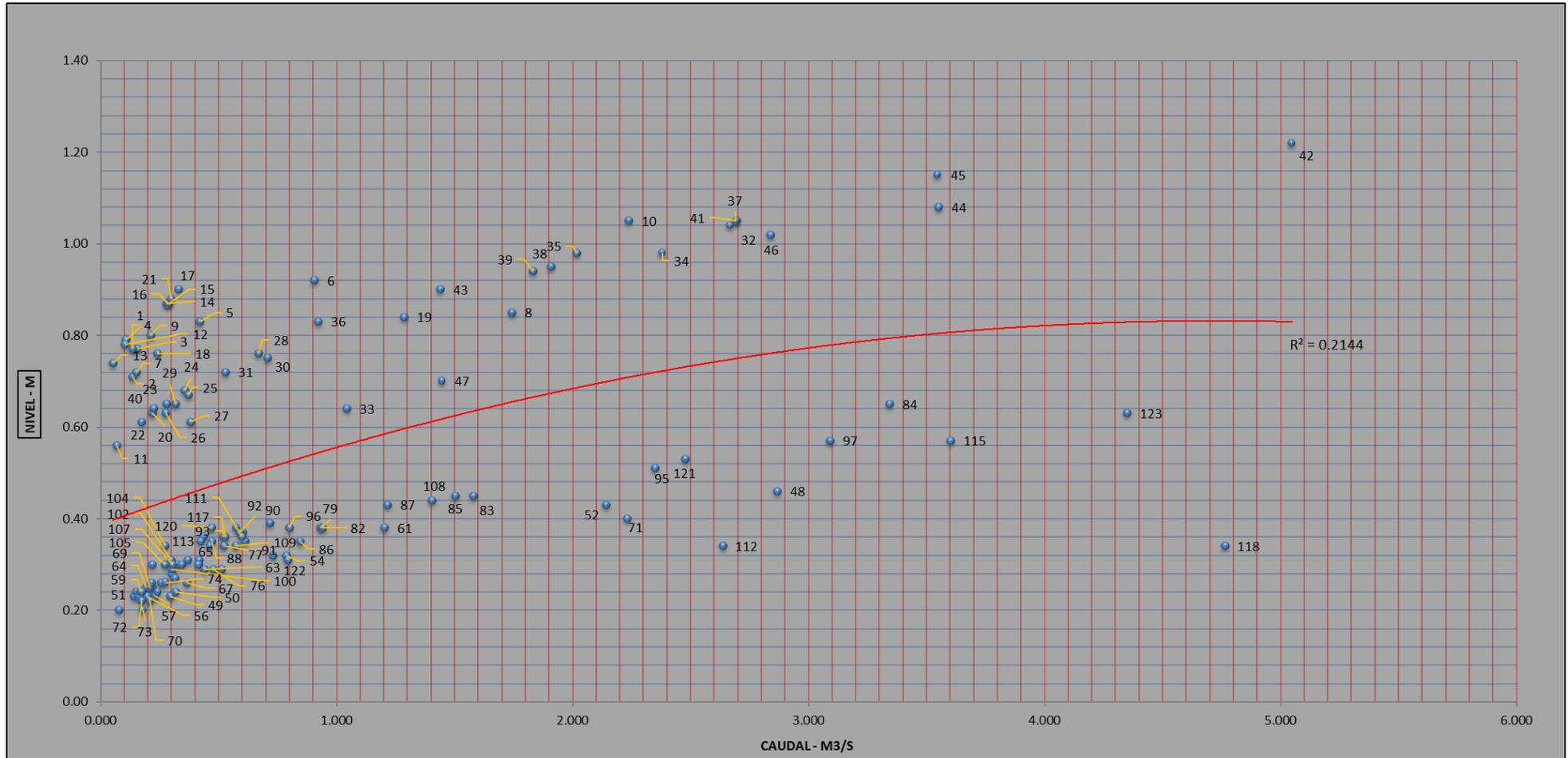
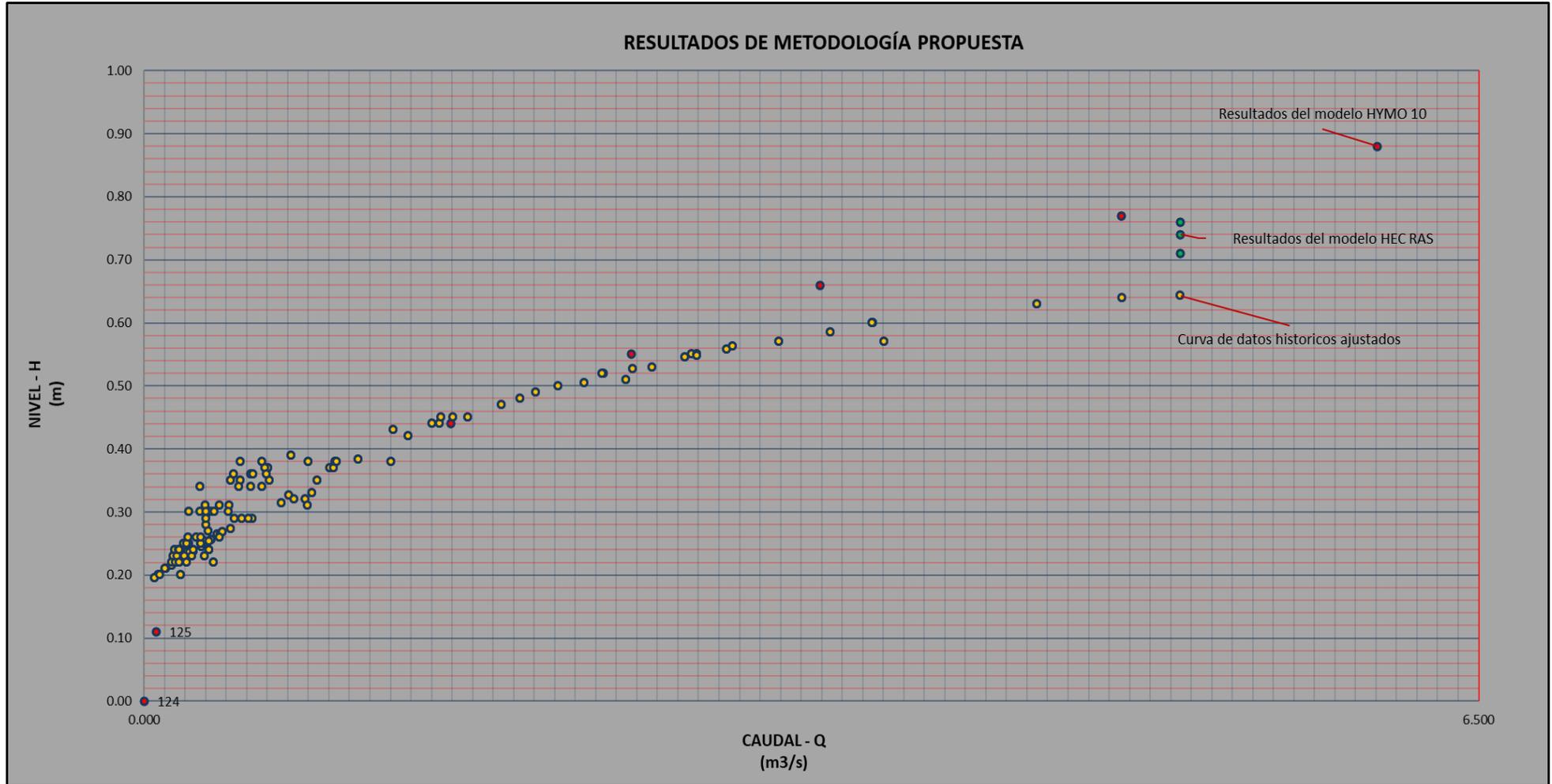


Figura 19. Resultados de la metodología propuesta
Fuente: Elaboración propia



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

En Ingeniería puede decirse que existen modelos de simulación buenos, regulares y menos precisos, sin embargo, es justo este grado de precisión el que depende de la cantidad y calidad de la información con la que se alimente el modelo, el cual nunca podrá entregar resultados con mayor precisión que la de los propios datos con los que se alimenta; de aquí la necesidad de brindar confiabilidad en la información obtenida en campo y la necesidad de calibrar los modelos para obtener resultados con mayor exactitud.

Aunque se realizaron repetidas simulaciones tanto con el modelo HEC RAS, como con el modelo HYMO 10, sus resultados tuvieron mayor coincidencia con la curva de calibración ajustada cuando se alimentaron con el coeficiente de rugosidad de 0,049 en el margen derecho, de 0,036 en el fondo o lecho y 0,040 en el margen izquierdo.

Cada simulación con el modelo HYMO 10 permite obtener una curva de calibración en contraste a la simulación con el modelo HEC RAS, el cual arroja un nivel para un caudal ingresado, sin embargo, como se observó en las gráficas anteriores el modelo HYMO 10 demostró no guardar relación entre sus resultados; caso contrario con el modelo HEC RAS, el cual evidencio una relación por encima del 90% entre sus resultados; Lo que indica que teóricamente los dos modelos deberían arrojar resultados similares.

Se podría considerar que la sensibilidad de ambos modelos o de alguno de los dos, no radica solo en el coeficiente de rugosidad de Manning como se planteó inicialmente. Aun así, se logra una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos con la implementación de la metodología planteada en este trabajo que sin el uso de esta.

Haber limitado este trabajo al ajuste de los coeficientes de rugosidad de Manning considerando la subjetividad inherente con el que se asignan estos valores y permitió evidenciar que no es la única variable que puede afectar los resultados. Se puede estudiar los resultados arrojados por los

modelos, ajustando variables como la pendiente y/o la sección de aforo considerando fenómenos de agradación y degradación fluvial, entre otras.

Finalmente se demuestra la importancia de analizar los datos con los que se va a alimentar un modelo de simulación hidráulico o hidrológico, ya que como se demostró, un previo análisis de la información permite establecer la necesidad de realizar ajustes o no de la misma, dando crédito a la confiabilidad de los datos. Para el caso en estudio, se comprobó que, al no realizar un ajuste del registro históricos de los datos obtenidos en campo la relación de sus variables no superó el 21%, mientras que con el ajuste de los datos aplicando la metodología propuesta, se logra una relación del 94%.

Sin ahondar a nivel internacional, en la práctica de la ingeniería se desconoce la existencia de un procedimiento estandarizado que permita reducir la incertidumbre de los resultados arrojados por los modelos hidrodinámicos.

Esta metodología experimental propone analizar y ajustar los datos observados para generar una curva de calibración confiable, permitiendo a su vez su uso como herramienta de calibración en los procesos de simulación, de modo que se pueda confirmar la validación de los resultados de un modelo hidrodinámico cuando su dispersión con respecto a la curva de calibración sea mínima. En caso de no contar con una estación hidrológica cercana al sitio de diseño, el resultado de una modelación hidrodinámica se debe ajustar a una serie de aforos líquidos realizados para tal fin.

6.2. LIMITACIONES

El HYMO 10 es un programa para el modelamiento hidráulico que discontinuó su uso a finales de la década de los 80, puede que su desactualización sea un factor que influya en los resultados obtenidos.

Se desconoce el grado de sensibilidad de los parámetros que componen la fórmula de Manning para determinar la variable o variables que pueden afectar la precisión de los resultados de un modelo de simulación.

6.3. APLICABILIDAD

Este trabajo pretende que la metodología experimental aquí propuesta se conozca, sea factible o probablemente se mejore para ser implementada en cada uno de los procesos de modelación necesarios para el estudio o diseño tanto hídrico como hidráulico que se requiera ejecutar, no solo a nivel regional o nacional.

Se abre la posibilidad de investigar y debatir a favor y en contra sobre lo aquí propuesto. Es un punto de partida para nuevas investigaciones sobre la confiabilidad de la información hídrica e hidráulica que maneja el país, los efectos sobre el medio ambiente, la revalidación de los riesgos en zonas vulnerables y la afectación sobre la economía nacional.

Así mismo se pueden realizar comparativos entre estudios o diseños planteados con esta metodología y algunos existentes, o por el contrario formular investigaciones que expongan los efectos sobre el medio ambiente y/o las afectaciones sobre la economía local o regional que puede generar los diseños con la implementación de esta metodología experimental.

Podrían realizarse estudios locales o regionales que evalúen la calidad de la información hídrica e hidráulica generada por las instituciones del sector ambiental del país o que se identifiquen las estaciones hidrológicas a nivel local regional o nacional que presentan inconsistencia en sus resultados; también estudios que identifiquen la generación del error asociado a los instrumentos, actividad en campo, procesamiento de la información, a los procesos de modelación, proponiendo alternativas de solución.

6.4. RECOMENDACIONES

Para el uso de cualquier modelo de simulación hidráulico y/o hidrológico, sería preciso seguir unos mínimos pasos que a pesar de no eliminan la incertidumbre en el resultado del modelo, no hacerlo, asegura para la mayoría de los casos la propagación del error hasta sus resultados. así mismo, estos pasos no necesariamente están restringidos al uso de los métodos estadísticos que impiden la oportunidad de conceptuar bajo un análisis crítico profesional, por ejemplo, calcular el promedio entre valores altos, medios y bajos o promediar resultados arrojados por diferentes fórmulas concebidas para un mismo fin, pero para condiciones diferentes.

Aunque de algún modo en la práctica profesional se usa el análisis crítico profesional para considerar la necesidad de realizar n calibraciones a un proceso de simulación hidrodinámica y considerar la obtención de buenos resultados, no se cuenta con una herramienta que permita establecer un límite de confianza a los mismos.

En los procesos de modelación es recomendable considerar las obstrucciones u obstáculos dentro de los cauces, los cuales generan variaciones en el comportamiento del flujo, pero también en las características hidráulicas de su sección.

Es importante considerar la existencia de fenómenos hidráulicos y de dinámica fluvial como la socavación, la sedimentación y/o cualquier otra condición hidráulica en la estación hidrológica aguas abajo de la misma en el sitio de diseño de obras o en las secciones de control, para garantizar que los datos obtenidos en las lecturas diarias de mira permitan la construcción real de la curva de calibración y poder realizar el correspondiente ajuste de esta: en caso contrario se debe usar alguna metodología que permita definir una curva de calibración interpolada entre resultados simulados y observados, generados por la socavación y sedimentación.

Los parámetros hidráulicos como área, velocidad y pendiente cambian al aforar en un sitio diferente y aún más cuando se trata de una creciente o nivel de agua alto, por lo que no se debe tener en cuenta datos de secciones diferentes cuando se va a hacer una extrapolación por el método de Steven, de hecho, se debe tener en cuenta esta consideración cuando se vaya a realizar una campaña de aforo.

REFERENCIAS

- ANLA. (2014). *Terminos de Referencia - EIA - Proyectos de Perforación Exploratoria de Hidrocarburos*. Santafé de Bogotá: ANLA.
- Barrales, L., Peña, I., & Fernandez, P. (2004). Validación de Modelos: Un Enfoque Aplicado. *Scielo*, 67-68.
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima, Peru: IMEFEN.
- Cabrera, J. (2012). *Validación de Modelos Hidrológicos*. Lima, Peru: IMEFEN.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. . Santafé de Bogotá: McGRALW - HILL.
- Fernández, M., Vela, A., & Castaño, S. (1997). La utilización de modelos en hidrología. *Universidad de la Rioja*, 8-10.
- Fundación Wikimedia, Inc. (16 de julio de 2021). *Wikipedia*.
- García, J., & Chocat, B. (1999). La modelación en el campo de la ingeniería hidráulica: reflexiones y discusiones sobre las causas y sus consecuencias. *Aqua-LAC*, 52-62.
- Mayer, D., Stuart, M., & Swain, A. (1994). Regression of real world data on model output: an appropriate overall test of validity. *Elsevier*, 93-104.
- Mitchell, P. (1997). Misuse of Regression for Empirical Validation of Models. *Elsevier*, 313-326.
- Múnera, M. (2013). *Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS y BRI-STARS, para la modelación Hidráulico-Morfológica en un cauce aluvial. Aplicación al río Negro (Antioquia)*. Medellín, Colombia.
- Ochoa R., T. (12 de febrero de 2020). Ingeniero Hidrologo. (R. Díaz, Entrevistador)

- Rauscher, M., Young, M., Webb, C., & Rohison, D. (2000). Testing the accuracy of growth and yields models for Southern hardwood forests. *Oxford Academic*, 176-185.
- Refsgaard, J., & Knudsen, J. (1996). *Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models*. Water Resources Research.
- Reynolds, M. (1984). Estimating the error in model predictions. *Forest Science*, 454-469.
- Salazar, A. (30 de octubre de 2019). Ingeniero Hidrologo. (R. Díaz, Entrevistador)
- Velandia Duran, E. A. (2006). *Marco metodológico para la modelación hidráulica e hidrológica de crecientes en ríos. Caso río Bogotá, El Espino - Alicachin*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Velandia, E. A. (2008). Efecto de la rugosidad de Gauckler-Manning en el tránsito de caudales de baja pendiente. *Épsilon*, 46-47.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO A: HIDROLOGÍA

7.2. ANEXO B: TOPOGRAFÍA HIDROGRÁFICA

7.3. ANEXO C: ENCUESTAS

7.4. ANEXO D. AFOROS EN CAMPO

7.5. ANEXO E. RESULTADOS MODELACIÓN HYMO-10

7.6. ANEXO F. RESULTADOS MODELACIÓN HEC-RAS