

HISTORIA SOBRE EL DESARROLLO DEL LABORATORIO, LA SECCIÓN DE HIDRÁULICA Y EL POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRÁULICOS

Rodrigo Cano G.

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*

PRESENTACIÓN

A solicitud de varios profesores escribo una historia de la Sección de Hidráulica desde mi vinculación a la Facultad como estudiante hasta la fecha cuando con la ayuda de Dios continuo siendo profesor

Presento disculpas anticipadas por hacer reiterada mención de actuaciones personales en varios episodios, pero esto es necesario para poder establecer continuidad en la historia.

1. INGRESO A LA FACULTAD

En febrero de 1954 ingresé a la Facultad de Minas como estudiante de "menos uno" en ingeniería civil. En ese tiempo debía cursarse un año preparatorio denominado menos uno para solidificar los conocimientos en matemáticas, ciencias básicas e idiomas antes de iniciar la carrera.

Mi propósito al ingresar a la Facultad de Minas era estudiar matemáticas, pero cuando conocí lo que es la ingeniería civil sentí que eso era lo que yo realmente quería.

En la década del 50 la Facultad de Minas ofrecía formación muy sólida en matemáticas, ciencias básicas, diseño vial, diseño estructural y mecánica de suelos, pero era muy deficiente en todo lo referente al manejo del agua.

Los desarrollos hidroeléctricos en Colombia y particularmente en Antioquia se habían iniciado a comienzos de la década del 30 y en la década del 50 se habían intensificado por la gran demanda de energía eléctrica producida por el desarrollo industrial.

Al interior de la Facultad de Minas se sentía la necesidad de intensificar la formación en hidráulica y las materias complementarias; los cursos que se ofrecían eran muy empíricos y no se enseñaban materias complementarias de la hidráulica tan importantes como hidrología y mecánica de fluidos.

2. LOS PROFESORES ALEMANES

Al finalizar la segunda guerra mundial, Alemania quedó en una profunda crisis económica y multitud de técnicos y científicos quedaron desempleados; para conseguirles trabajos el gobierno Alemán negoció contratos de colaboración técnica con otros gobiernos y enviaba técnicos y científicos a enseñar en Universidades extranjeras.

En 1955 llegaron a la Facultad de Minas cuatro profesores Alemanes: Werner Schultz, profesor de física. Fue muy interesante para quienes en primer año habíamos recibido física con Jorge Mejía, recibir en segundo año física con Schultz y comparar dos estilos fundamentalmente diferentes de tratar esta importantísima ciencia. El Dr. Mejía enseñaba física con planteamientos teóricos soportados en un tratamiento matemático profundo y complejo, todo esto manejado con un orden exquisito, pero nunca se soportaba en la experimentación, siempre enseñaba en el tablero. El Dr. Schultz enseñaba una física muy simple, parecida a la que se enseñaba en bachillerato, pero soportada en mucha experimentación, construía los aparatos para la experimentación con elementos muy sencillos, esta cualidad la he tratado de imitar en todos mis trabajos, siempre enseñaba en el laboratorio.

Joseph Chepanquevich, profesor de geología. También pudimos comparar sus cursos con los de Gabriel Trujillo. El Dr. Chepanquevich era más práctico, más ingeniero de campo.

Richard Higlig, profesor de resistencia de materiales y hormigón. Un excelente profesor, muy didáctico y profundo en sus planteamientos. Los profesores nacionales de estas materias y estructuras eran muy bien preparados y los ingenieros egresados de la Facultad de Minas eran muy sólidos en toda el área estructural pero con una formación muy regida por los planteamientos y normas americanas. El Dr. Higlig nos presentó los planteamientos europeos, esto nos sirvió de complemento y refuerzo en la formación estructural que recibimos y fue excelente; sólo tuvimos una dificultad: en cuarto año recibimos hormigón con el Dr. Higlig con sistema europeo, en quinto año tuvimos que recibir hormigón con el Dr. Velásquez en sistema americano, porque los dos sistemas en ese tiempo eran muy diferentes y todos los ingenieros en nuestro medio utilizaban el sistema americano.

Alexander Borges, profesor de hidráulica. Sus cursos eran empíricos y tradicionales igual que los que aquí se dictaban, pero su mérito consistió en convencer a los directivos de la Facultad de Minas de que era necesario poseer un laboratorio de hidráulica. La Facultad disponía de buenos laboratorios en todas las áreas de la ingeniería, pero carecía de un laboratorio de hidráulica.

En años anteriores el profesor americano Hunter Rouse había diseñado y construido un laboratorio de hidráulica muy moderno para la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá y cada año la Facultad de Minas tenía que enviar a Bogotá durante una semana un profesor con todo el grupo de estudiantes a hacer una serie de prácticas en el laboratorio de hidráulica; los estudiantes sólo veíamos correr agua pero no entendíamos los fenómenos hidráulicos, esto era un desperdicio de tiempo y recursos.

3. PLANEAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

En 1957 la Facultad de Minas encomendó al Dr. Borges diseñar un laboratorio de hidráulica; este proyecto se elaboró pero el profesor Borges regresó a Alemania el año siguiente.

El diseño de un laboratorio de hidráulica es muy complejo porque se requiere proyectar un edificio con unas características muy especiales, y unos equipos que

concurden con el edificio y permitan efectuar prácticas didácticas y experimentales. Se requiere planear las prácticas tanto didácticas como experimentales que se desea ofrecer, diseñar los equipos necesarios y un edificio que permita instalarlos y operarlos correctamente.

El Dr. Borges diseñó un edificio que en términos generales servía para laboratorio de hidráulica pero no se diseñó equipos y sólo proyectó dos bombas para circulación de agua y tres turbinas Pelton, Kaplan y Francis.

En los años 1958 y 1959 la Facultad de Minas emprendió la construcción del edificio para el laboratorio de hidráulica y compró en Alemania las dos bombas las cuales aun están en operación y las tres turbinas actualmente fuera de servicio.

El edificio fue construido por ingenieros sin conocimiento de los requerimientos de un laboratorio de hidráulica y quedó con múltiples deficiencias, se terminó su construcción y no se instalaron los equipos.

Estas instalaciones y equipos permanecieron inutilizados hasta 1961 cuando el Dr. Luis D'Greiff siendo decano de la Facultad emprendió la habilitación de tanques para almacenamiento de agua, instalación de tuberías y bombas para circulación de agua y la instalación de las turbinas pero el laboratorio permaneció fuera de servicio.

4. VINCULACIÓN COMO PROFESOR A LA FACULTAD DE MINAS

En diciembre de 1959 terminé mi curso de ingeniería civil y en los años 1960 y 1961 trabajé en la compañía de ingenieros consultores Integral S.A. en el diseño e interventoría de construcción de la presa Troneras y el túnel Tenche-Troneras en Carolina. Allí tuve la gran oportunidad, a pesar de ser un ingeniero recién egresado, de poder participar en trabajos importantes de alta ingeniería, me sentía muy fuerte trabajando en estructuras y mecánica de suelos pero muy deficiente en hidráulica, mi permanencia en la zona de este proyecto la tomé como un entrenamiento de aprendizaje y procuré incursionar en todas las áreas de ingeniería que allí se requerían, pero a comienzos de 1962 y antes de concluir el proyecto sentí que ya había aprendido todo lo que allí podía aprender y debía regresar a estudiar más.

El Dr. Peter Santamaría, Decano de la Facultad de Minas me propuso que ingresara como profesor a enseñar hidráulica y poner en operación el laboratorio de hidráulica, yo le respondí que con agrado le recibía el cargo pero que debía enviarme a estudiar porque mis conocimientos en hidráulica eran muy deficientes, él aceptó la condición y me vinculó como profesor de tiempo completo a la Facultad de Minas a partir de febrero de 1962.

5. VIAJE DE ESTUDIO A ATLANTA

Durante el primer semestre de ese año enseñé hormigón o concreto y estructuras hidráulicas, en abril pedí a un compañero que estudiaba hidráulica en Georgia Tech en Atlanta, información sobre los cursos en hidráulica y materias complementarias que allá se dictaban, él me respondió prontamente y la información fue satisfactoria para mí. Presenté una solicitud de admisión a Georgia Tech, pero como el año lectivo comenzaba en septiembre los plazos para solicitar ingreso estaban vencidos; no obstante lo anterior, cuando el Decano de la Facultad de Ingeniería Civil supo que era profesor de la Facultad de Minas hizo una excepción y le dio trámite a mi solicitud.

El Dr. Santamaría como Decano de la Facultad de Minas escribió al Dr. Shutz, Decano de Ingeniería Civil en Georgia Tech informándole que yo era profesor de la Facultad de Minas, viajaba a Georgia Tech a estudiar hidráulica y el planeamiento y montaje de un laboratorio de hidráulica y regresaría siendo profesor de la Facultad de Minas. Esta carta tuvo tanta influencia en las directivas y profesores de Georgia Tech que de allí en adelante se me brindaron todas las facilidades necesarias para que pudiera iniciar estudios en septiembre de 1962.

Cuando informé al Dr. Santamaría que había sido aprobado mi ingreso a Georgia Tech tuvo grandes dificultades para conseguir que la Universidad Nacional aprobara mi comisión de estudio, porque se requiere una vinculación mínima de dos años a la Universidad para conseguir este beneficio y yo tenía cuatro meses de vinculación, viajó varias veces a Bogotá a tramitar la comisión de estudio ante la Rectoría de la Universidad nacional y finalmente la consiguió.

En agosto me casé y viajé con mi esposa a vivir en Atlanta y realizar el curso de especialización en hidráulica, fue una experiencia maravillosa conocer un país desarrollado con cultura diferente a la nuestra, tanto las directivas y

profesores de Georgia Tech como las personas con quienes estuvimos en contacto nos trataron con suma amabilidad y se esforzaron porque estuviéramos bien, la imagen que conservo de los americanos es muy positiva porque nos trataron muy bien a mi esposa y a mí.

La primera semana de septiembre llegamos a Atlanta y el 21 de ese mes comenzaron las clases, inicialmente tuve grandes dificultades porque el único inglés que sabía era el aprendido en bachillerato, en la Facultad y unos pocos cursos antes de viajar, no obstante las directivas de Georgia Tech me brindaron las facilidades necesarias para aliviar esta situación.

Se me asignó como profesor consejero al Dr. Carl Kindsvater, un americano de origen alemán especialista en hidráulica, con amplia experiencia en investigación experimental; el profesor Kindsvater procuró que tomara todos los cursos necesarios para complementar mi formación matemática y prepararme en forma actualizada en hidráulica y materias afines como hidrología y mecánica de fluidos; tuvo conciencia muy clara de que al regresar a la Facultad de Minas yo debía diseñar, construir y poner en operación un laboratorio de hidráulica y organizar una sección de hidráulica que no existía y permanentemente me orientaba en todos los tópicos necesarios para conseguir estos propósitos. Se esforzó mucho porque aprendiera el arte de los modelos hidráulicos; en ese tiempo apenas comenzaban los computadores en su forma más elemental y se trabajaba exclusivamente en modelos físicos, no existían los modelos matemáticos. El profesor Kindsvater se esforzó por resolverme todos mis problemas, no sólo los de tipo académico sino muchos de tipo personal, y procuraba que estuviera en contacto con personas importantes que pudieran aportarme algo en mis conocimientos. En una oportunidad invitó al profesor Hunter Rouse, investigador muy eminente en mecánica de fluidos, a dictar una conferencia en Georgia Tech; antes de la conferencia me lo presentó y le informó que yo estaba preparándome para diseñar y construir un laboratorio de hidráulica en Medellín, inmediatamente Rouse respondió: "Para qué van a construir otro laboratorio hidráulico en Colombia si en Bogotá existe uno muy bueno que yo diseñé y construí? El Dr. Rouse no sabía que Bogotá y Medellín son dos ciudades distantes.

Adicionalmente, el profesor Kindsvater procuró que yo adquiriera formación en el estudio de los recursos hidráulicos.

Es importante reconocer y agradecer toda la colaboración que la Facultad de Ingeniería Civil del Georgia Institute of Technology prestó a la Facultad de Minas para que yo me preparara adecuadamente y pudiera planear y organizar el laboratorio y la sección de hidráulica.

6. LA ORGANIZACIÓN DEL LABORATORIO Y LA SECCIÓN DE HIDRÁULICA

En diciembre de 1963 regresé a Medellín y en enero de 1964 me reintegré a mis labores en la Facultad de Minas; al reiniciar labores el Dr. Santamaría me dijo "ponga en operación el Laboratorio de Hidráulica", hice inventario de lo existente y encontré que el laboratorio de hidráulica era un edificio diseñado y construido para tal propósito pero con múltiples deficiencias que impedían su utilización: los tanques para almacenamiento de agua en los sótanos poseían grietas y fugas, no estaban interconectados, no tenían desagües hacia el exterior y para vaciarlos se requería el uso de bombas, los equipos existentes eran dos bombas para circulación de agua y tres turbinas, no existía tanque elevado para suministrar agua a presión constante; las bombas sólo permitían circular agua con limitaciones porque se había construido una almenara o chimenea de equilibrio muy baja conectada a la bomba principal y cuando ésta operaba se rebosaba y derramaba la almenara inundando instantáneamente una sala para estudiantes de dibujo que existía en el segundo piso del edificio; las turbinas sólo permitían una demostración visual de cómo opera una máquina hidráulica, pero no permitían hacer mediciones y experimentaciones; no existían más aparatos para experimentación en hidráulica ni equipos de medida. En la Sección de Hidráulica se ofrecían cursos de Hidráulica muy empíricos y desactualizados; Estructuras Hidráulicas, Centrales Hidroeléctricas, estos dos últimos muy buenos y actualizados; Acueductos, muy deficientes; y Alcantarillados, igualmente pobre.

El inventario de lo existente en la Sección de Hidráulica me mostró que debía trabajar simultáneamente en tres áreas diferentes: dictar las cátedras que se me asignaran como profesor de tiempo completo, planear, diseñar, construir y montar los equipos requeridos por un Laboratorio de Hidráulica con propósitos didácticos, y replantear los cursos ofrecidos por la Sección y plantear los cursos faltantes necesarios para actualizar la enseñanza en el manejo del agua.

7. EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Para poner en operación el Laboratorio de Hidráulica se requería adecuar el edificio, diseñar, construir, montar y poner en operación los equipos para enseñanza didáctica y experimentación. La adecuación del edificio se consiguió con la impermeabilización de tanques y la construcción de un tanque elevado sobre el techo del edificio, hoy tercer piso; para esta labor se consiguieron recursos. La construcción de equipos fue muy difícil porque no existían fondos para ello, para conseguir recursos decidimos comenzar haciendo modelos hidráulicos para clientes externos a la Facultad; este planteamiento era difícil de realizar porque en Colombia no existía la práctica de hacer modelos hidráulicos, los pocos que se requerían eran contratados con universidades americanas o europeas, en el país no existía experiencias al respecto; yo había estudiado modelos hidráulicos bajo la dirección del profesor Kindsvater, hombre con amplia experiencia en esta área, pero mis estudios habían sido teóricos y no poseía experiencia al respecto. Venciendo todas estas dificultades convencimos a la compañía de Ingenieros Consultores Integral S.A. que me permitieran efectuar el estudio en un modelo hidráulico del pozo de aquietamiento para una válvula de chorro hueco a instalar en la represa de Miraflores, en Carolina, propiedad de las Empresas Públicas de Medellín; una válvula similar había sido instalada en la represa de Troneras sin modelación y estaba causando serios problemas.

La realización del estudio en este modelo hidráulico tuvo grandes dificultades: yo tenía los conocimientos teóricos necesarios para realizar un estudio en un modelo hidráulico pero mi experiencia era nula; en la Facultad de Minas y en nuestro medio no existían ingenieros con experiencia al respecto a quienes se pudiera consultar; en el laboratorio de hidráulica sólo existía el edificio y las bombas para circulación de agua; no existían equipos para medir caudales, velocidades, presiones, niveles y otras variables importantes; y para resolver estas dificultades me tocó solo afrontar todo el planteamiento teórico, construcción, montaje y operación del modelo, construir y calibrar todos los equipos para medida de variables necesarios.

La estructura para el modelo del pozo de aquietamiento se construyó en madera con ventanas con vidrio para poder observar los fenómenos al interior, pero el modelo de la válvula de chorro hueco debía construirse en metal

y no disponíamos de conocimientos ni experiencia para ello; acudimos al Instituto Tecnológico Pascual Bravo y los profesores de metalurgia gustosamente nos ayudaron, nos pidieron que les suministráramos el diseño de la válvula modelo y los materiales necesarios para su construcción, los estudiantes construían la válvula como una práctica para el estudio requerido, parte se construyó en bronce en bronce y parte en acero inoxidable. El soldar estos dos metales fue un proceso técnico complejo.

Se efectuó el estudio en este modelo hidráulico con grandes resultados: la estructura para el pozo obtenida a partir de los diseños existentes trabajaba defectuosamente, de haberse construido hubiera sido un fracaso, a partir de modificaciones graduales para corregir las deficiencias se obtuvo una estructura finalmente diferente de la estructura inicial y operaba satisfactoriamente. Cuando se inauguró la estructura construida y se puso en operación se comparó su comportamiento con la operación del modelo consignada en fotografías y la similitud fue perfecta, esto hizo que se diera crédito a la capacidad del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad para realizar estudios en modelos hidráulicos y se le asignaron otros trabajos como: modificaciones al pozo de quietamiento de la represa de Troneras; vertederos, túnel para desviación y estructura de salida en la presa de Santa Rita; desarenador para la Central Caracolí y otros.

Los trabajos en modelos hidráulicos constituyeron la fuente de financiación para el desarrollo del laboratorio pero faltaban los aparatos para enseñanza y experimentación.

Se inició el diseño de aparatos para enseñanza, experimentación y medidas y su construcción se hizo en el Pascual Bravo; el primer aparato que se construyó fue un canal que aun existe en el laboratorio, actualmente horizontal con pendiente fija pero inicialmente era de pendiente variable. Este canal tenía un costo importante para ese tiempo, los metales para su construcción se compraron con los ingresos obtenidos con los modelos hidráulicos, sus paredes hoy son de acrílico pero inicialmente eran de vidrio donado por Peldar; la red de tuberías de acero para la circulación de agua en el laboratorio fue donada e instalada por las Empresas Públicas de Medellín, la construcción del canal la hicieron los estudiantes del Pascual Bravo bajo la dirección de sus profesores, pero como era un trabajo largo solicitaron

alguna remuneración, nosotros no teníamos dinero para pagarles su trabajo pero en el laboratorio había un viejo motor Diesel que no prestaba ningún servicio y estorbaba por su tamaño; este aparato era útil para el Pascual Bravo para prácticas didácticas en los cursos de maquinaria, decidimos canjear el motor por el trabajo, pero hacer ese canje implicaba un proceso complejo y para resolver esta situación enviamos el motor que nos estorbaba a que fuera guardado en el Pascual Bravo, y es posible que todavía este allá. Durante este proceso nos fabricaron en Pascual Bravo varios medidores Venturi en tubería.

El proceso de desarrollo de laboratorio continuó con el diseño y construcción de aparatos hasta llegar a su estado actual.

En 1965 la Facultad envió a cuatro estudiantes destacados que iban a mitad de carrera a terminar estudios en universidades americanas y regresar a reforzar su profesorado, de ellos fueron muy importantes Himerio Pérez y Horacio Muñoz; a su regreso el primero se vinculó al Laboratorio de Hidráulica y el segundo se dedicó a iniciar la organización de una sección de Ingeniería Sanitaria que no existía en la Facultad.

Posteriormente, se vincularon al laboratorio los ingenieros Jairo Murillo y su esposa, Circe Urania Sencial ambos destacados expertos en hidráulica, todos ellos contribuyeron a impulsar el desarrollo del laboratorio diseñando y construyendo muchos aparatos para enseñanza y operación.

Lastimosamente se presentan circunstancias paradójicas en la vida: Jairo Murillo gran experto en hidráulica murió ahogado en el río Magdalena en Puerto Berrio, Himerio Pérez igualmente importante en hidráulica murió ahogado en el embalse Miraflores en Carolina, en sus vidas relativamente cortas se destacaron profesionalmente y ejercieron influencia muy importante en el desarrollo actual del laboratorio y la sección de Hidráulica de la Facultad. Para ellos pedimos a Dios se les recompense en donde se hallen.

8. LA SECCIÓN DE HIDRÁULICA

En 1964 la Facultad, ofrecía un curso de hidráulica en dos semestres con presentación empírica y desactualizada, cursos de acueductos y alcantarillados igualmente atrasados y cursos en obras hidráulicas y centrales hidroeléctricas con muy buen nivel académico.

Al reiniciar labores decidí actualizar la Sección de Hidráulica, los cursos que se ofrecían continuaron inicialmente como los estaban tratando y posteriormente se modificaron; se ofreció un curso de Hidrología de aguas superficiales y subterráneas, un curso de Flujo en Canales con un semestre en "estados permanentes" y un semestre en "estados no permanentes" y un curso de Mecánica de Fluidos con tratamiento vectorial.

El preparar los programas para los nuevos cursos y elegir los textos guía no fue difícil, pero ofrecer los cursos fue muy difícil porque no existían en nuestro medio profesores especializados que fueran capaces de dictarlos; inicialmente me tocaron todos a mí, pero posteriormente la Facultad envió profesores a estudiar al exterior y a su regreso se encargaron de estos cursos.

En las décadas posteriores, la Facultad ha enviado continuamente profesores a estudiar en el exterior y hoy la Sección de Hidráulica posee un amplio profesorado con especialización en las diferentes áreas requeridas para el manejo del agua y preparación académica a nivel de Doctor o Magister.

9. RECURSOS HIDRÁULICOS

A comienzos de los años 60 se sentía en nuestro medio la necesidad de estudiar el uso de los recursos hidráulicos en forma racional; hasta ese tiempo se planteaba el aprovechamiento del agua de un río con un propósito único y se ignoraban otros posibles usos, en ese periodo se estaba trabajando intensamente en el aprovechamiento de las fuentes de agua principalmente para generación de electricidad o acueductos.

En 1964 la Facultad realizó un acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud OPS y la Organización Mundial de la Salud OMS con el propósito de preparar a ingenieros de nuestro medio y a los estudiantes de la Facultad en el manejo de los recursos hidráulicos; con base en este acuerdo estas entidades financiaron la realización de cursos avanzados para ingenieros y estudiantes en hidrología, desarrollo de recursos hidráulicos y planeación de obras; se trajeron profesores del exterior y profesores colombianos viajaron a dictar algunos de los cursos aquí ofrecidos en universidades de otros países; mi profesor consejero en Georgia Tech, Kindsvater, vino en 1965 a dictar un curso sobre Desarrollo de Recursos Hidráulicos, yo viajé en 1967 a Uruguay a dictar un curso de Hidrología en la

Universidad de la República de Montevideo, en 1973 viajé a Panamá a dictar un curso sobre Programación de Obras y en 1975 dicté el mismo curso en Costa Rica.

En 1985 existía buena trayectoria en la Facultad sobre el estudio de los recursos hidráulicos y con la iniciativa de Darío Valencia y de otros profesores organizamos el Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos el cual ofrece en la fecha preparación de estudiantes hasta nivel de Maestría y Doctorado.

La organización del posgrado en Recursos Hidráulicos significó una competencia fuerte entre la Facultad de Ingeniería Civil de Bogotá y la Facultad de Minas, porque la Universidad Nacional en ese momento sólo estaba en capacidad de financiar un posgrado; la competencia se decidió a favor de la Facultad de Minas porque estaba mejor preparada y actualizada en las áreas requeridas.

Cabe el honor al Posgrado de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas de haber concedido el primer título de Doctor en Ingeniería en Colombia, otorgado al profesor Germán Poveda.

10. INVESTIGACIÓN EN HIDRÁULICA FLUVIAL

Múltiples culturas humanas se han desarrollado en las zonas ribereñas, pero el conocimiento sobre el comportamiento dinámico del río es aun deficiente; a fines del siglo 15 y comienzos del 16 el gran artista Florentino Leonardo Da Vinci estudió el río y presentó una descripción apreciativa sobre su comportamiento pero no presentó una descripción apreciativa sobre su comportamiento pero no presentó sistemas de cálculo que permitan cuantificar las variables más representativas. En 1776 el ingeniero Frances Antoine Chezy presentó la primera ecuación que se conoce para el cálculo de la velocidad media del agua en un canal, esta ecuación está afectada por un coeficiente de fricción para el cual solamente en los últimos años se ha obtenido ecuación que permita su cálculo. En 1845 simultáneamente el ingeniero Frances Henry Philibert Gaspard D'arcy y el alemán Julius Weisbach propusieron ecuaciones muy similares para el cálculo de la velocidad media del agua en el canal; esta ecuación también está afectada por un coeficiente de fricción difícil de calcular. En 1886 se publicó una ecuación para el cálculo de la velocidad media propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning y modificada por otros.

Estas tres ecuaciones permiten calcular la velocidad media del agua en canales, pero todas requieren previamente calcular un coeficiente de fricción correspondiente al canal y cuyos sistemas de cálculo no han sido satisfactorios. En 1957 la División de Hidráulica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles nombró un Comité de Trabajo compuesto por 5 ingenieros destacados en hidráulica y les encomendó estudiar toda la información existente a la fecha sobre factores de fricción en canales y proponer ecuaciones para el cálculo de la velocidad media en canales con flujo uniforme. En 1961 después de reunir toda la información mundial disponible sobre el tema asignado y estudiar más de 200 documentos, el Comité de Trabajo presentó su informe con la conclusión de que la mejor ecuación para el cálculo del flujo uniforme en canales es la conocida como Darcy-Wiesbach, pero a la fecha 1961 no se dispone de ecuaciones confiables para calcular su factor de fricción; el Comité propuso investigar:

1. Definir la rugosidad equivalente de los canales
2. Estudiar la transición de superficie hidráulicamente lisa a rugosa
3. Estudiar factores de fricción para grandes rugosidades
4. Estudiar canales compuestos
5. Estudiar factores de fricción en canales con fondo móvil y determinar cuando un canal con fondo fijo se transforma en canal con fondo móvil.

A partir de 1975 comencé a estudiar el flujo uniforme en canales principalmente con rugosidad y pendientes altas; consulté toda la información disponible a la fecha y el mejor estudio consultado fue el informe de la Comisión de Trabajo pero a la fecha se había investigado muy poco de lo recomendado; tomé las recomendaciones de esta Comisión como una tarea para mí y después de analizar 5 puntos propuestos, encontré que el 2 no justifica estudio porque en la gran mayoría de los canales el flujo tiene superficie hidráulicamente rugosa; el numeral 4 es un problema de alta complejidad asociado a múltiples variables y muy difícil de generalizar, por estas razones no lo estudié, los puntos 1 y 3 los estudié siguiendo la misma metodología empleada por Nikuradse para el estudio de tuberías o sea construir canales con granos de grava o arena pegadas en su fondo y paredes para conseguir una rugosidad conocida y experimentar en ellos para con este trabajo experimental conseguir ecuaciones que permitan calcular en forma confiable los factores de fricción para canales desde muy lisos como los que se

usan en el laboratorio, contruidos con vidrio o acrílico, hasta muy rugosos como canales de ríos y quebradas con piedras grandes y rocas en su fondo; el punto 5 referente a canales con fondo móvil lo estudié en el laboratorio en canales con grava suelta en el fondo y lo confronté en canales naturales de ríos y quebradas con piedras y rocas en su fondo, con este estudio desarrollé ecuaciones que permiten calcular el movimiento simultáneo del agua y los sólidos como arena, grava, piedra y roca en los canales naturales. El estudio del movimiento de la carga sólida se había hecho a nivel mundial en canales de laboratorio y utilizando arena y gravas pequeñas, yo estudié este problema en canales de laboratorio utilizando gravas desde pequeñas hasta gruesas y lo confronté con medidas en ríos que mueven rocas grandes como el Piedras en Puente Iglesias el cual mueve rocas de 2m de tamaño y 11 toneladas de peso.

11. USO DE LOS COMPUTADORES

Hasta 1960 los cálculos hidráulicos eran largos y tediosos porque las ecuaciones utilizadas generalmente son complejas y los equipos de cálculos disponibles eran muy simples; se utilizaba la regla de cálculo y la calculadora mecánica, esto obligaba al uso de tablas con funciones trigonométricas y logarítmicas, diagramas, gráficos, curvas, etc. y la precisión en los cálculos era muy baja, el advenimiento de los computadores agilizó y modificó los sistemas de cálculo en hidráulica, hoy no se utilizan esas herramientas y se entregan al computador las ecuaciones para que éste las resuelva con velocidad y precisión altísima, esto hace que de los libros tradicionales de hidráulica ya sólo use la parte conceptual.