

CONTRIBUCIÓN DE LA FACULTAD DE MINAS AL DESARROLLO DE LA HIDROELECTRICIDAD EN COLOMBIA

Darío Valencia Restrepo

La hidroelectricidad es considerada una fuente de energía renovable, en razón de su aprovechamiento del ciclo hidrológico del planeta, y la forma más limpia de generación después de las energías solar y eólica. De otra parte, los embalses a ella asociados ofrecen múltiples propósitos, en particular la regulación de caudales cada vez más extremos debido al cambio climático; sin embargo, en la actualidad es muy necesario tener en cuenta sus efectos sobre los ecosistemas y las poblaciones humanas que pueden sufrir traumáticos desplazamientos.

Como es creciente la demanda por energía, la cual en gran medida es responsable del calentamiento global por el uso generalizado de combustibles fósiles, los proyectos hidroeléctricos constituyen una alternativa de futuro en el mundo y en Colombia. Este recurso hidráulico proporciona el 16 % de la electricidad mundial, pero en nuestro país corresponde aproximadamente al 65 % de la capacidad instalada, y al mismo tiempo se dispone de un enorme potencial nacional y regional sin aprovechar, todavía con opciones de interés. El alto valor de este último porcentaje pone de presente la gran importancia de los proyectos hidroeléctricos que desde fines del siglo XIX se han construido y operado en Colombia, entre los cuales han sido particularmente exitosos los llevados a cabo en el departamento de Antioquia.

A continuación, se discurrirá sobre la contribución de ingenieros asociados a la Facultad de Minas, de la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia, al desarrollo hidroeléctrico del país. Este trabajo considera que los aportes de la Institución son, fundamentalmente, los de sus profesores y, por extensión, los de sus egresados; aunque también es necesario incluir contribuciones de tesis de posgrado y de proyectos de investigación y extensión.

El Numeral 2 presenta las contribuciones generales de la Institución y en los siguientes numerales se detallarán los mismos. Pero es apropiado empezar con el Numeral 1 para conocer la importancia del recurso hidroelectricidad en el departamento de Antioquia.

Todos los nombres que se mencionarán en este artículo corresponden a profesores e ingenieros egresados de la antigua Escuela de Minas, hoy Facultad de Minas, que se han destacado por sus aportes al progreso de la hidroelectricidad en Colombia. Varios de esos egresados han sido también profesores de la Institución.

1. POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

En 1979 el Departamento Nacional de Planeación presentó un inventario del potencial hidroeléctrico del país para centrales con capacidad superior a 100 megavatios, MW, en el cual aparece que al departamento de Antioquia le correspondían 23 556 MW, equivalentes aproximadamente a un cuarta parte del total nacional (Interconexión eléctrica S. A.). Dado el tiempo transcurrido, se hacía necesaria una actualización del inventario para el

departamento mencionado, en especial porque afortunadamente renace el interés por las grandes centrales, y las menores de 100 MW han venido cobrando mayor importancia.

El Banco de Iniciativas Regionales para el Desarrollo de Antioquia, BIRD Antioquia, auspició la actualización del inventario de tan importante recurso y publicó un estudio que incluye además significativos capítulos sobre aspectos conceptuales, históricos y estratégicos, amén de una reseña del gran proyecto hidroeléctrico denominado central Hidroituango (Múnera-López y Sánchez-Echeverri, Potencial hidroeléctrico de Antioquia-Inventario, perspectivas y estrategias). Las nuevas estimaciones del potencial departamental arrojaron un total de 20 418 MW para centrales mayores de 100 MW y de 3529 MW para menores de 100. La reducción de los 23 556 MW indicados en el estudio de 1979 a los 20 418 MW del nuevo estudio se debió a la eliminación de algunos proyectos y a la reducción del tamaño de otros por motivos ambientales.

Señala la fuente del BIRD Antioquia que el departamento tenía en operación 45 centrales hidroeléctricas con una capacidad agregada de 3803 MW, correspondiente al 28,6 % de los 13 300 con que contaba el país. Aunque se encontraban en construcción seis centrales de este tipo con potencia total igual a 3503 MW, se afirma que en el departamento existe todavía la posibilidad de nuevos aprovechamientos, en general no tan atractivos como los ya construidos.

Afirma el mismo documento del BIRD Antioquia que la riqueza antioqueña del recurso en cuestión es consecuencia de la disponibilidad de aguas, diferencias de alturas y geología favorable, pero llama la atención sobre la necesidad de definir el tamaño apropiado de cada

posible aprovechamiento. Señala también que el sector eléctrico ha sido, es y debe ser motor del crecimiento y desarrollo de Antioquia, y que el departamento ofrece excelentes oportunidades para la inversión en proyectos hidroeléctricos y plantas industriales que requieran grandes cantidades de energía eléctrica confiable y a precios competitivos. En efecto, como parte de un foro reciente sobre la presencia de Antioquia en la construcción del país, uno de los trabajos estudió los aportes de la ingeniería antioqueña al progreso industrial e hidroeléctrico y señala cómo el desarrollo hidroeléctrico impulsó el avance de la industria al proporcionarle energía abundante y a buen precio (Múnera-López, Aportes de la ingeniería antioqueña en los siglos XX y XXI pág. 103).

De otra parte, Antioquia ha podido utilizar el potencial hidroeléctrico de varios ríos mediante cadenas de plantas con embalse regulador, tales los casos de los significativos proyectos en las cuencas de los ríos Guadalupe, Nare-Guatapé y Porce. En particular, el sistema de cuatro centrales hidroeléctricas que llevan el nombre Guadalupe ha sido una verdadera escuela de capacitación para profesionales, técnicos y obreros antioqueños. Guadalupe I fue considerada por la revista Credencial Historia como una de las diez obras de ingeniería más importantes del siglo XX en Colombia (Valencia-Restrepo, La central hidroeléctrica Guadalupe I).

2. APORTES GENERALES DE LA FACULTAD DE MINAS

Ejemplar ha sido el desarrollo de la energía en Colombia, al punto de que un estudio de competitividad global publicado en 2012 clasifica el país en el quinto puesto entre 146 naciones (Periódico El Colombiano). Agrega que la energía eléctrica del país, según el

índice empleado, es de alta calidad, confiable y respetuosa con el medio ambiente. Puede entonces afirmarse que diferentes empresas, universidades y firmas de ingeniería han hecho posible un destacado aprovechamiento del potencial hidroeléctrico de Colombia y, en particular, el correspondiente a Antioquia.

2.1 Impulso a los proyectos hidroeléctricos

Los egresados de la antigua Escuela de Minas fueron pioneros en la identificación, estudio y realización de los primeros proyectos hidroeléctricos con el fin de aprovechar la abundancia de las aguas y la mucha presencia de montañas en el territorio regional. Puede afirmarse que en los últimos cien años los graduados de dicho centro educativo, así como de otras facultades de ingeniería de la región, han venido sustituyendo la dependencia que inicialmente se tuvo de la ingeniería del exterior, gracias al avance de sus conocimientos en campos como climatología e hidrología, hidráulica, geología, equipos electromecánicos, construcciones civiles, investigación de operaciones, estudios socioeconómicos, ecología... Tal como se explica en el Numeral 3, los estudios relacionados con los proyectos hidroeléctricos han contribuido al desarrollo de una cultura científica y tecnológica en el medio.

Fueron ingentes los esfuerzos a lo largo de los años con el fin de aprovechar los grandes recursos hidroeléctricos de Antioquia. Así ocurrió desde 1898, cuando empezó a funcionar la modesta planta Santa Elena con 250 kW de potencia, hasta la entrada de Porce III con 660 000 kW en 2011. Un análisis muestra que el crecimiento en buena medida ha sido de carácter exponencial y que el impulso mayor tuvo lugar a partir de la creación en 1955 de las

Empresas Públicas de Medellín E. S. P., EPM, entidad modelo por su acertado planeamiento a la luz del crecimiento de la demanda de energía y de las posibilidades económicas y financieras, al igual que por el éxito de sus proyectos en cuanto a calidad técnica, costos y tiempos previstos. La entidad adelanta hoy la construcción del proyecto hidroeléctrico de mayor capacidad en la historia del país, la central Hidroituango, el cual tendrá una capacidad final de 2400 MW y empezará a entrar paulatinamente en servicio a partir de 2018.

2.2 Una cultura empresarial de lo público

Conviene destacar también que dichos egresados han propiciado la creación de una cultura empresarial de lo público, para lo cual será necesario ocuparse en el Numeral 5 de los antecedentes y el surgimiento de EPM. Dicha institución es propietaria de la mayoría de las centrales de generación hidroeléctrica instaladas en el departamento de Antioquia, las cuales constituyen aproximadamente un 25 % de la capacidad total del país.

2.3 Un libro histórico

Existe un libro de gran formato en dos tomos de quien fuera distinguido decano de la Facultad de Minas, Peter Santa-María (1908-2005), el cual presenta un recorrido histórico de la institución hasta 1970, durante el cual se ocupa de las realizaciones de connotados profesores y egresados de la Facultad de Minas en pro del desarrollo hidroeléctrico de Antioquia (Santa-María págs. 251-258 y 279-281), entre los cuales incluye pioneros y visionarios como Francisco-Eladio Restrepo (1897-1961), Julián Cock-Arango (1892-1982), Carlos Gartner de la Cuesta (1883-1974), Horacio Toro-Ochoa (1907-1960), Alberto

Vásquez-Restrepo (1947-2016), Gustavo Mesa-Arango (1909-1997), José Tejada-Sáenz (1919-2011), Alejandro Uribe-Escobar (1919-2016) y Óscar Mejía-Vallejo (1928-2009).

3. UNA CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Los proyectos hidroeléctricos han impulsado en forma notable el avance de la cultura científica y tecnológica en el medio. En efecto, numerosas disciplinas y profesiones concurren en los estudios de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad, así como en el diseño, la construcción y la operación de dichos proyectos. A lo largo de aproximadamente un siglo se han dado en Colombia y Antioquia procesos de transferencia y apropiación de tecnología, así como desarrollos propios que son producto de la capacitación del talento nacional (Valencia-Restrepo, Los proyectos hidroeléctricos en Antioquia).

El presente numeral está basado en un artículo complementario de la conferencia citada en el párrafo precedente, titulado “Avances en ciencia y tecnología propiciados por los proyectos hidroeléctricos” (Valencia-Restrepo, Avances en ciencia y tecnología propiciados por los proyectos hidroeléctricos). Dicho artículo fue actualizado para adicionar, entre otros aspectos, el nombre de profesores y egresados de la Facultad de Minas que han hecho contribuciones sustanciales al desarrollo de la hidroelectricidad. Las afirmaciones e ideas que el autor presenta en este numeral son principalmente el resultado de su análisis de información propia u obtenida en visitas al programa de Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y a las Empresas Públicas de Medellín, así como en una conversación con el ingeniero Fabio Villegas-Gutiérrez (Villegas-Gutiérrez).

El gran progreso que la hidroelectricidad ha tenido en Colombia y en Antioquia pone de presente la calidad que han alcanzado los especialistas, profesionales, empleados y obreros que han participado en una actividad tan importante para el bienestar y progreso del país.

Más adelante se esbozan los avances en algunas áreas de la cultura científica y tecnológica que han sido propiciados en Antioquia por los estudios relacionados con los proyectos hidroeléctricos. Al respecto, notable ha sido la participación de profesores y egresados de la Facultad de Minas.

Para terminar esta introducción a este numeral, es del caso indicar que el mismo no pretende ser exhaustivo. Ojalá historiadores de la ingeniería se ocupen en el futuro del tema con mayor profundidad.

Climatología – Hidrología. Mucho se ha avanzado en el conocimiento de los regímenes hidrológicos tropicales de interés en Colombia y en Antioquia. Particular mención merecen los muchos estudios llevados a cabo en el programa de posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos, de la Facultad de Minas, sobre caudales máximos y mínimos, así como la influencia del fenómeno El Niño en la hidrología colombiana.

Conviene resaltar una importante culminación de los trabajos anteriores cuando se da a conocer el *Atlas hidrológico de Colombia* (Unimedios), mediante el cual con ayuda de un programa de computador es posible cuantificar el recurso hídrico en cualquier sitio de país, incluso donde no se poseen registros históricos, con lo cual es posible prever los riesgos de

inundaciones y sequías. Esta importante contribución estuvo a cargo de los profesores Germán Poveda-Jaramillo, Jaime-Ignacio Vélez y Óscar Mesa-Sánchez, acompañados por un nutrido grupo de estudiantes, y ella mereció el significativo reconocimiento de la Fundación Alejandro Ángel Escobar en la categoría Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible correspondiente al año 2007 (Fundación Alejandro Ángel Escobar).

Los estudios sobre el fenómeno El Niño, llevados a cabo por profesores y estudiantes del programa de posgrado ya mencionado, han permitido una interlocución con universidades y agencias de investigación de carácter internacional. En particular, el profesor Poveda-Jaramillo recibió en 1999 otro galardón de la mencionada Fundación, esta vez en la categoría de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con el trabajo titulado Retroalimentación dinámica entre el Fenómeno El Niño /Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia (Fundación Alejandro Ángel Escobar).

Es imprescindible destacar el trabajo institucional realizado por firmas consultoras como Integral S. A. y Sedic S. A., y así mismo el de las entidades estatales EPM, Interconexión Eléctrica S. A., conocida como ISA, e Isagen en el campo de los regímenes pluviales y fluviales de Antioquia, así como en lo relativo a la producción y transporte de sedimentos, con énfasis en las implicaciones de su depósito en embalses. Un año después de la fundación de EPM en 1955, se creó allí la sección de hidrología con el fin de instalar y mantener la red hidrométrica, así como procesar, validar y conservar la información hídrico-meteorológica requerida por la entidad. Cincuenta años más tarde se contaba con una red de 198 estaciones que es utilizada, entre otros fines, para el planeamiento de nuevos

proyectos de generación de energía, la operación de las centrales existentes y la comercialización de energía en la bolsa.

Es apropiado concluir lo anterior destacando la gran utilidad de los datos de las estaciones de medida y de los correspondientes análisis estadísticos y probabilísticos llevados a cabo por las entidades antes indicadas y la Facultad de Minas. Indudablemente ello se ha reflejado en un planeamiento, diseño y operación de los proyectos hidroeléctricos que se ha caracterizado por el mejor aprovechamiento del recurso agua en la generación eléctrica.

Los estudios hidrológicos también han debido ocuparse de las propiedades físicas y químicas del agua, y en el caso de los proyectos hidroeléctricos ello ha cobrado en Antioquia particular importancia con respecto a los fenómenos de eutrofización y sedimentación. Lo primero tiene que ver con la calidad del agua que los embalses suministran a las conducciones y turbinas de una central, en tanto que lo segundo con la vida útil de los mismos.

Geología. Conocimiento geológico regional. La construcción de las centrales tuvo un efecto positivo sobre el conocimiento geológico local y subregional. Puede señalarse que el Servicio Geológico Nacional publicó tres informes al respecto entre 1940 y 1960.

Ingeniería geológica. Si bien el batolito antioqueño, en estado de roca fresca, ofrece excelentes características geotécnicas, su descomposición por efecto de la meteorización química da lugar a saprolitos de gran espesor. Como consecuencia de la mala calidad geotécnica de dichos saprolitos, se ha optado por excavar túneles y cavernas en la roca

fresca con el fin de ubicar las centrales hidroeléctricas. Ello ha resultado en el mejoramiento de los conocimientos en mecánica de rocas, geotecnia de macizos rocosos, etc.

Determinación del riesgo sísmico. Las entidades financiadoras internacionales de obras hidroeléctricas, como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo, empezaron, desde la década de 1970, a exigir estudios sobre el riesgo sísmico de los lugares donde se construyen las presas y se llenan los embalses. El resultado fue la contratación de empresas consultoras como Woodward Clyde, que trajeron a Colombia geólogos especialistas en neotectónica y en geología del Cuaternario que fueron a trabajar con empresas consultoras locales como Integral y Sedic. Allí complementaron su formación numerosos ingenieros geólogos y geólogos colombianos. Además, se le dio un gran impulso a los conocimientos sobre la evolución reciente de las cordilleras colombianas, como lo demuestran los trabajos presentados en el Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia realizado en Bogotá en 1980.

Tasas de denudación. La preocupación por la vida útil de los embalses también fomentó las investigaciones acerca de la erosión en las cuencas que los alimentan, estudios que han seguido hasta la actualidad.

Geomorfología regional. ISA contrató en 1981 con la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia la realización del estudio geomorfológico de la zona de influencia de los embalses de Oriente, lo cual permitió un conocimiento a escala semidetallada de las geoformas y procesos de la región.

Fenómenos catastróficos. El aguacero torrencial caído en las cabeceras del río San Carlos el 21 de Septiembre de 1990 destruyó parte de la central Calderas y motivó una serie de trabajos acerca de las consecuencias de ese evento catastrófico, desafortunadamente seguido por muchos otros.

Otros temas relacionados. En forma indirecta también se han generado, a partir de las cuencas con represas, aportes en temas como la circulación de aguas subterráneas en los macizos ígneo-metamórficos, las tasas de meteorización química y la evolución de los paisajes de los altiplanos antioqueños.

Michel Hermelin-Arbaux (1937-2015) fue un egresado de la Facultad de Minas que tuvo participación muy destacada, tanto nacional como internacionalmente, en diferentes campos de la geología como los antes mencionados.

Ingeniería. De mucha importancia ha sido la participación de diferentes ramas de la ingeniería como civil, eléctrica, mecánica, forestal y de sistemas en el diseño y construcción de obras civiles, así como en el montaje de estructuras y maquinarias complejas, estos últimos que hoy pueden ser llevados a cabo en su totalidad por personal nacional. Se menciona en especial:

Presas de suelo. Los suelos residuales profundos son preponderantes en la región central de Antioquia, donde se localizan varios de los proyectos hidroeléctricos importantes. Cuando se iniciaron estas obras no había buen conocimiento del comportamiento de estos suelos

porque los desarrollos técnicos, preponderantemente en Europa y Norteamérica, se habían hecho sobre los suelos transportados y sedimentarios. Fue necesario investigar y diseñar las estructuras para las condiciones de estos suelos de alta humedad natural, gran porosidad y con comportamiento de suelos preconsolidados.

Diseño sísmico de presas. Luego se desarrollaron las investigaciones y diseño sísmico de presas construidas con los suelos anteriores, sobre lo que no se tenía conocimiento previo. El diseño y la construcción de estructuras antisísmicas hace ya parte de la cultura asociada con los proyectos hidroeléctricos.

Presas de concreto compactado (CCR). Su construcción se inició en varios países en la década del ochenta. La aplicación más importante de presas de CCR con alto contenido de pasta y gran volumen, unos 1,4 millones de m³, se hizo en el caso de Porce II. Esto requirió la fabricación de complejos instrumentos de laboratorio y la investigación del efecto de la meteorología tropical en la construcción y control de calor de estas presas.

En el campo de las presas, merecen mención especial los pioneros trabajos de Fabio Villegas Gutiérrez, un reconocido consultor de prestigio internacional.

Túneles. Los túneles en estos terrenos deben penetrar a través de gruesas capas de suelos residuales y saprolitos, en condiciones de alta humedad y baja resistencia al esfuerzo cortante. Para atender estas situaciones se han desarrollado técnicas constructivas sui géneris, mediante la adaptación de metodologías desarrolladas en otros países.

Construcción. Importantes firmas del concierto internacional, en consorcio con firmas nacionales, han obtenido mediante licitación contratos para construir los grandes proyectos hidroeléctricos de Antioquia. Puede decirse que el talento y conocimiento nacional está preparado desde hace varios años para acometer por su cuenta la construcción de dichas obras, pero por lo general ello no ha sido posible por falta de la capacidad financiera requerida.

La complejidad de los proyectos ha exigido el uso de avanzadas técnicas de construcción adaptadas a las condiciones de la región. Los resultados son por lo general muy satisfactorios. Un hecho merece destacarse en el panorama de las grandes obras públicas del país: algunos proyectos de EPM han terminado costando menos de lo presupuestado y en plazo inferior a lo previsto.

Líneas de transmisión. La interconexión del sistema eléctrico nacional se debe a la extensa red de líneas de alta tensión que cubre buena parte del territorio colombiano, y es el resultado de un gran progreso en el planeamiento, diseño y operación que exige dicha red. Puede destacarse lo relativo a la optimización, protección y estabilidad, así como los estudios que han llevado a un mayor conocimiento y caracterización de los niveles cerámicos en el país. Este último aspecto es importante en el diseño de las líneas de transmisión pues en Colombia son extraordinariamente comunes las descargas atmosféricas.

Hidráulica. Dado que es fundamental conocer el comportamiento del agua en las diferentes estructuras de un proyecto hidroeléctrico con el fin de prever la operación y

elaborar el diseño de aquellas, significativo ha sido el impulso que han recibido los estudios teóricos y experimentales sobre el movimiento del agua en ríos, canales, túneles, tuberías, embalses, vertederos y descargas. En atención a los graves problemas de erosión en las regiones montañosas de Antioquia, los trabajos anteriores han requerido muchas veces tener en cuenta la producción, transporte y depósito de diferentes tipos de sedimento. Un resultado adicional ha sido el impulso recibido por la docencia y la experimentación relacionadas con la mecánica de fluidos y la hidráulica.

Una herramienta útil para el trabajo anterior lo constituyen los modelos reducidos. La Facultad de Minas fue pionera en el estudio del comportamiento de grandes estructuras de los proyectos hidroeléctricos mediante el uso de modelos reducidos de las mismas. La interpretación de los resultados obtenidos con estos modelos a escala permite deducir el comportamiento de los prototipos. Al frente de esos estudios estuvo principalmente el profesor Rodrigo Cano-Gallego (1932-2008).

Investigación de operaciones y estadística. En muchos momentos de la evaluación, diseño y operación de los proyectos hidroeléctricos se hace necesaria la aplicación de principios y técnicas de probabilidad y estadística. Ello es consecuencia, entre otros aspectos, del riesgo y la incertidumbre asociados con ocurrencias hidrológicas, las demandas futuras de energía y potencia, el estado de embalses y plantas del sistema interconectado nacional, eventuales situaciones macroeconómicas y beneficios y costos futuros.

Existe un área de trabajo que ha colocado al país en un punto muy alto en el concierto internacional, seguramente no la única pero que se señala en razón de su importancia nacional y regional. Se trata de los métodos muy elaborados utilizados por el sector eléctrico para el planeamiento de la expansión y para el planeamiento de la operación del sistema eléctrico nacional, en especial por parte de la antigua ISA y EPM, con la sustancial contribución de la consultoría nacional e internacional y con estudios adelantados por la Facultad de Minas. Se ha utilizado allí un amplio repertorio de modelos probabilísticos para las series de tiempo hidrológicas, entre los cuales podría mencionarse aquellos de memoria larga y los de desagregación. También merece señalarse el uso de la simulación de sistemas al igual que de avanzadas técnicas de programación matemática, tal el caso de la optimización no determinística, en particular relacionada con el uso de la programación dinámica estocástica. En el caso de un proyecto individual, lo anterior permite estimar la energía y la confiabilidad con que ella podrá entregarse al sistema interconectado nacional, la potencia que puede suministrarse al mismo y las fechas apropiadas para la entrada del proyecto. Trascendentales han sido los aportes en este campo de Óscar Mesa-Sánchez y Ricardo Smith-Quintero.

Un artículo sobre la estadística en la Facultad de Minas (Valencia-Restrepo, La estadística en la Facultad de Minas (1940-1990)) describe modelos y procedimientos como los que se acaban de comentar, tan importantes para el avance del sector hídrico-térmico de generación eléctrica en Colombia

Finalmente, dos modelos hidrológicos de carácter probabilístico asociados con colombianos han merecido la atención internacional: uno de memoria larga que contó con la

participación de José Manuel Mejía (Mejía, Dawdy y Nordin) y otro para la desagregación de series hidrológicas (Valencia R. y Schaake Jr.), originado en la tesis de Darío Valencia-Restrepo presentada en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, MIT.

Sistemas. La ingeniería de sistemas ha hecho una contribución fundamental en lo que respecta a la elaboración de programas especializados, así como a la organización y sistematización de la información. Es del caso destacar los programas orientados a la operación de embalses, y también aquellos elaborados para el planeamiento de la expansión y el planeamiento de la operación conjunta de proyectos hidroeléctricos y termoeléctricos, para lo cual se aplican las técnicas de optimización y simulación de sistemas indicadas en el presente numeral. Así mismo, han sido necesarios programas para el manejo de la información, especialmente la de carácter hidrológico.

De otra parte, se han llevado a cabo modernas aplicaciones en telemedición que permiten a los centros de control adoptar decisiones óptimas para la operación remota de embalses, plantas y circuitos de transmisión y distribución. Ello ha hecho necesaria la participación tanto de la ingeniería electrónica como la de sistemas.

Ecología. En la década de los setenta, EPM inició la aplicación de estudios de impacto ambiental en el desarrollo del río Nechí. En ese entonces apenas se estaban esbozando las metodologías al respecto. En la actualidad se llevan a cabo completos estudios físicos, bióticos y antrópicos con el fin de mitigar o compensar los efectos negativos de las obras sobre el hábitat. La larga tradición en la protección forestal y el manejo de cuencas de aquella entidad han constituido un modelo reconocido en el país; debe destacarse la

participación del área ingeniería forestal, de la actual Facultad de Ciencias Agrarias de la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia, en la cuenca Piedras Blancas, muy útil por su aprovechamiento como experiencia piloto.

Un ejemplo reciente lo constituye lo realizado por EPM con respecto al proyecto Porce III, cuya plena operación se inició en 2011. La identificación y evaluación de impactos del proyecto se realizó mediante el análisis de las características actuales del ambiente en sus dimensiones física, biótica y social, sobrepuestas con las del proyecto en sus etapas de construcción y operación. El análisis permitió proyectar en tiempo y espacio las condiciones ambientales de la zona con y sin proyecto.

Mercados y estudios socioeconómicos. La bolsa de energía es un sistema de información en el cual los generadores y comercializadores del mercado de energía mayorista realizan las transacciones de electricidad, mediante las ofertas de precios, la disponibilidad de los recursos de generación y las demandas de energía de los comercializadores. Dichas transacciones se hacen en forma directa en la bolsa o a través de contratos. Así se obtiene el resultado económico de cada agente participante. Isaac Dynner-Rezonzew se ha destacado por sus significativas contribuciones en este campo.

De otra parte, intenso ha sido el uso de técnicas para la evaluación económica, social y financiera de los proyectos hidroeléctricos. Los enormes recursos en juego cuando de un gran proyecto se trata exigen un estudio cuidadoso de los beneficios directos e indirectos que se derivan del mismo, así como los costos de diverso orden en que se incurre y la capacidad financiera de la empresa dueña del emprendimiento. En particular, la lenta

recuperación del capital invertido exige un análisis de fondo sobre los recursos de crédito que son indispensables para el éxito del proyecto.

Gerencia de proyectos. Dada la complejidad de los proyectos se han establecido técnicas de gerencia de proyectos que permiten controlar los costos, programas y resultados de los proyectos en forma sistemática, atendiendo debidamente indicadores de gestión. Esto se ha desarrollado como una cultura que se ha extendido a otras áreas. En este campo se requirieron adaptaciones para las condiciones locales.

Matemática. Casi todos los aspectos científicos y profesionales antes descritos requieren el lenguaje, los conocimientos y los procedimientos de la matemática, particularmente de áreas como geometría, álgebra, análisis, ecuaciones diferenciales, teoría de probabilidad y estadística, métodos numéricos y, en general, las llamadas matemáticas aplicadas. Es de interés conocer entonces aspectos del desarrollo histórico de las matemáticas en la Facultad de Minas (Valencia-Restrepo, El desarrollo de las matemáticas en la Facultad de Minas de Medellín).

Comentarios finales. Los aspectos comentados en los párrafos precedentes han servido para que se avancen y se perfeccionen las actividades científicas y técnicas en las universidades regionales, muy en particular en la Facultad de Minas; en firmas consultoras como Integral, Consultores Técnicos Ltda., Sedic, Ingetec S. A., Mejía Villegas S. A. y Mejía Millán y Perry Ltda., entre otras; y en entidades como EPM, ISA e Isagen. Debe darse especial crédito a estas tres últimas por el patrocinio de muchos de los trabajos que antes se señalaron, sobre todo en sus etapas iniciales.

No es fácil citar nombres de especialistas de las firmas consultoras antes indicadas pues cualquier lista será incompleta y con un grado de subjetividad. Sin embargo, es conveniente presentar ante las nuevas generaciones figuras emblemáticas que sirvan de ejemplo y referencia. Con respecto a trabajos pioneros relacionados con los proyectos hidroeléctricos se menciona a los ingenieros José Tejada-Sáenz y Óscar Mejía-Vallejo de la firma Integral, Javier Mesa-Salazar (1922-1987) de Estudios Técnicos y Lucio Chiquito de Sedic.

4. EI PROGRAMA DE POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRÁULICOS

En atención a sus aportes al desarrollo hidroeléctrico del país, se presentan a continuación algunos breves aspectos relacionados con la historia del programa de posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos, de la Facultad de Minas. Así mismo, se destacarán sus principales aportes al sector de la hidroelectricidad. Existe una publicación sobre los primeros 20 años (Escuela de Geociencias y Medio Ambiente). El programa ha sido reconocido como grupo de excelencia en todas las convocatorias de Colciencias, y en 2007 recibió el Premio Nacional al Mérito Científico en la categoría de “Grupos de Investigación de Excelencia”, otorgado por la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia (ACAC).

Antecedentes. Fue importante como antecedente el programa de Magíster en Ingeniería Civil con Especialización en Matemáticas Aplicadas, llevado a cabo entre los años de 1968 y 1970 con la participación de distinguidos profesores de matemáticas de la Universidad

Nacional en Bogotá y al cual se inscribieron como alumnos varios profesores de la Facultad de Minas que culminaron sus estudios y recibieron el título respectivo. De otra parte, el área de hidráulica de dicha facultad gozaba en la década del ochenta de un prestigio en dicho campo a raíz de diferentes estudios e investigaciones, principalmente en lo tocante a modelos a escala reducida de estructuras relacionadas con proyectos hidroeléctricos. Esta última fue una labor iniciada por el profesor Rodrigo Cano Gallego y seguida por otros profesores.

Surge el programa de Maestría. Con el apoyo del Programa ICFES-BID para el desarrollo de la capacidad de investigación, inicio actividades en 1984 el programa de posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos conducente al título de Magíster. El programa definió las siguientes áreas iniciales de investigación: Planeamiento y Manejo de Recursos Hidráulicos, Hidrología Estocástica, Sistemas Hidrológicos, Hidrología del Agua Subterránea e Hidráulica. Las actividades se llevaron a cabo en las nuevas instalaciones construidas en el llamado Edificio de Hidráulica.

Doctorado. Una década después se dio aprobación y comienzo al programa Doctorado en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, aspiración presente desde la iniciación del programa anterior, el cual se constituyó en una especie de etapa previa al doctorado. Fue el primer programa doctoral en ingeniería del país, desde el primer momento considerado como modelo para futuros programas similares. Germán Poveda Jaramillo presentó y logró la aprobación en 1998 de la primera tesis doctoral de ingeniería en Colombia con el título “Retroalimentación dinámica entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y la Hidrología de Colombia”. Director de la misma fue Óscar Mesa-Sánchez y se contó con un Comité de

Tesis de carácter internacional. La tesis estudió los efectos sobre la hidrología colombiana de fenómenos macroclimáticos que ocurren en escalas de tiempo interanuales, tales como El Niño y La Niña (las dos fases del ENSO: El Niño-Oscilación del Sur), y otros como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), y en escalas intra-anales como la Oscilación de Madden-Julian, las ondas tropicales del este, los huracanes, y sus efectos sobre la hidroclimatología de Colombia. Dicha tesis recibió en 1995 el Premio a la mejor Tesis de Doctorado en el Congreso “Hydrology Days” de la American Geophysical Union.

Temas centrales del programa. Una comunicación del profesor de la Facultad de Minas Óscar Mesa-Sánchez permitió conocer los temas centrales alrededor de los cuales gravita la actividad académica del posgrado (Mesa-Sánchez): la formación del recurso humano, no solo con asignaturas sino con trabajo de investigación en los temas del ejercicio profesional; hidrología; influencia del clima; asuntos hidráulicos y de hidrodinámica; la cuestión del ambiente; y planeamiento, en muy diversas escalas y bajo marcos diferentes.

Aportes de tesis. Se presenta una lista de 32 tesis de Maestría en Ingeniería (Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, *Tesis*) entre las cuales siete merecieron la distinción de Meritoria. Estas se detallan a continuación, con indicación de su respectiva contribución principal.

“Confiabilidad en el planeamiento de la expansión de los sistemas hidrotérmicos” (1987) de José Medardo Prieto Suarez y dirigida por Óscar Mesa Sánchez y Darío Valencia Restrepo. Estudia la confiabilidad del suministro de energía en la fase inicial de la

expansión de los sistemas hidrotérmicos de potencia, con un proceso estocástico no estacionario que permite ver el comportamiento probabilístico de la respuesta del sistema, bajo la suposición de una representación agregada del sistema y que los caudales que alimenten el modelo agregado sean de naturaleza markoviana.

“Evaluación de centrales de generación-bombeo para regulación estacional, en sistemas fundamentalmente hidroeléctricos” (1988) de Carlos Alberto Osorno Giraldo y dirigida por Hernán Darío Ramírez. Presenta propuestas metodológicas para la evaluación económica para la instalación de centrales de generación-bombeo de tipo estacional con aportes hidrológicos naturales en sistemas hidroeléctricos.

“Análisis económico, social y ambiental de los planes de expansión en el sector eléctrico colombiano” (1989) de Carlota Maria Nicholls Estrada y dirigida por Óscar J. Mesa y Ricardo A. Smith. Evalúa alternativas de expansión en el sector eléctrico colombiano mediante conceptos del análisis con múltiples objetivos y con el empleo de una técnica discreta.

“Un modelo nacional desagregado para la formulación de políticas para el uso racional de energía” (1996) de Carlos Jaime Franco Cardona y dirigida por Isaac Dyner R. Se enfrenta el problema del análisis de políticas energéticas nacionales, su efecto sobre las regiones de Colombia, y las consecuencias que producirían sobre el total del país políticas energéticas regionales. Para estos propósitos se desarrolla un modelo nacional desagregado en regiones y estratos socio-económicos, el cual permite simular el comportamiento del sector energético colombiano bajo los efectos de tales políticas.

“Estudio de la evolución futura de sistemas de generación en ambiente de competencia” (1997) de Santiago Fernando Montoya Moreno y dirigida por Ricardo A. Smith Q. Se tratan los problemas de competición y privatización en la transición hacia mercados desregulados. La investigación está directamente enfocada a la evaluación de la expansión en ambientes de competencia, a partir de la estructura actual del mercado energético y de sus participantes en el sector eléctrico colombiano. Se plantea una herramienta de modelación denominada Dinámica de Sistemas, su forma de trabajo y la posible aplicación al caso de la expansión de sistemas eléctricos en competencia.

“Beneficios de la predicción hidrológica en el sector eléctrico colombiano, considerando la variabilidad climática” (1997) de Luz Dary Rendón Pérez y dirigida por Óscar J. Mesa Sánchez. Se realiza una evaluación a posteriori de la operación del sistema eléctrico colombiano por medio de un modelo de predicción apoyado en la metodología MARS (Multivariate Adaptive regression Splines) que incluye la influencia, posiblemente no lineal, de fenómenos naturales de gran escala como El Niño-Oscilación del Sur, sobre la hidrología colombiana y un modelo de operación de embalses en programación dinámica estocástica adaptiva, que tenga la posibilidad de acceder en tiempo real a tal predicción.

“Metodología y herramienta computacional para la identificación y evaluación automatizada de proyectos hidroeléctricos con derivación y a pie de presa” (2016) de Ricardo Hernández Arango y dirigida por Luis Fernando Carvajal Serna. Se ocupa de la optimización del proceso de búsqueda y evaluación preliminar de las condiciones técnicas de aprovechamientos hidroeléctricos de diferente tipo. Su enfoque estuvo dirigido al

desarrollo de una metodología y a su implementación mediante una herramienta basada en los sistemas de información geográfica (SIG). Para la consecución del objetivo general planteado, se decidió abordar el problema desde el punto de vista de la evaluación energética de alternativas. A su vez, dicha evaluación se llevó a cabo mediante un enfoque de análisis distribuido que aplicó el procesamiento sistemático de datos espaciales de tipo raster y vectorial, de tal manera que se permitiera caracterizar hidrológica y morfológicamente el territorio. La eficacia de la metodología y de la herramienta se validó con la comparación entre los resultados obtenidos y la configuración y las características reales de proyectos hidroeléctricos existentes de diversos tipos.

Aportes de proyectos de investigación y extensión. Se presenta una lista de 27 proyectos de investigación y extensión (Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, *Proyectos*) relacionados con el aprovechamiento de la hidroelectricidad, la cual incluye para cada proyecto su formato, autor principal, título, producción y publicación, fecha, descripción física, idioma, grupo de investigación, bibliografía, contenido y resumen. Como la descripción de cada uno de esos proyectos desbordaría los límites del presente trabajo, en lo que sigue solo será posible referirse a las principales contribuciones de los mismos.

Deben destacarse los estudios para una mejor comprensión de los regímenes de las variables del ciclo hidrológico, en especial lluvias y caudales de ríos en Colombia, tanto en diversas escalas de tiempo como de espacio, con particular interés en promedios y valores extremos (mínimos y máximos) y en la influencia de fenómenos como El Niño y La Niña.

Los balances hidrológicos permitieron estimar el caudal promedio multianual de los ríos sobre toda la red hidrográfica del país, información necesaria para la reestimación de potenciales hidroeléctricos.

Se desarrolló un Sistema de Información Geográfica de la Hidroclimatología de Colombia que permite conocer las variables más importantes del ciclo hidrológico sobre cualquier cuenca de Colombia. Las investigaciones continuaron para construir un Atlas Hidrológico de Colombia, de gran utilidad para estimar los efectos de las fases extremas del ENSO (El Niño y La Niña) y otros fenómenos macroclimáticos sobre los caudales medios y extremos de Colombia. En el mismo Atlas se desarrolla una novedosa metodología para estimar caudales extremos, máximos y mínimos, para distintos períodos de retorno; se trata de un insumo necesario para cualquier estudio de ingeniería hidrológica relacionado con múltiples aplicaciones en diseño de estructuras hidráulicas; planeamiento, manejo y ordenamiento del territorio; planes de alerta temprana contra inundaciones y sequías, etc.

Se concibieron y aplicaron modelos estadístico-matemáticos para pronosticar caudales medios mensuales de ríos del país, teniendo en cuenta la alta dependencia de la hidrología colombiana con respecto a fenómenos macroclimáticos como El Niño. Dichos caudales son importantes para sectores como el eléctrico, agropecuario, fluvial y salud.

Los estudios sobre la terrible deforestación en Colombia presentan un panorama desolador pues la misma destruye la estabilidad del ciclo hidrológico y del clima, lo que tiene por consecuencia una intensificación de las sequías y las inundaciones. Un trabajo de 2010 demostró que la ausencia del bosque tropical resulta en menores tasas de precipitación,

menores tasas de producción de escorrentía y convergencia de humedad atmosférica, así como en disminución de los almacenamientos de agua en el suelo y la atmósfera.

Finalmente, son de importancia las investigaciones sobre evidencias y señas del cambio climático en Colombia, al igual que sobre la existencia de una relación entre la variabilidad climática y la salud humana. Por sus trabajos en este campo, el profesor Germán Poveda Jaramillo representa a Colombia como miembro del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), una organización que en 2007 recibió, conjuntamente con Al Gore, el Premio Nobel de la Paz.

Investigaciones recientes. Una comunicación del profesor de la Facultad de Minas Germán Poveda-Jaramillo permitió señalar recientes desarrollos en el programa de posgrado en cuestión (Poveda-Jaramillo). Como ya se dijo, los proyectos hidroeléctricos han tenido un papel central en las actividades de dicha facultad relacionadas con los recursos de agua. Al propiciar estos proyectos el encuentro interdisciplinario, los mismos han tenido un efecto estimulante sobre diversas disciplinas de las ciencias naturales y sociales. La consiguiente creación de conocimiento ha dado lugar a nuevos desarrollos transdisciplinarios con aplicaciones en salud humana (malaria, dengue, leishmaniasis), agricultura (café, banano, cítricos), riesgos y desastres naturales (tormentas intensas, inundaciones, deslizamientos, sequías, definición de rondas de inundación, planificación territorial, etc.), oceanografía y procesos costeros, calidad de aguas y del aire, contaminación y remediación, entre otros. Lo anterior ha puesto de presente un proceso dinámico digno de mención.

5 LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN (EPM)

Profesores y egresados de la antigua Escuela de Minas tuvieron participación importante en los antecedentes de EPM, cuando diferentes servicios públicos domiciliarios hacían parte de entidades independientes, las llamadas secciones, pues “La organización de las Empresas Públicas Municipales, sin precedentes en América Latina, fue creación de los ingenieros de la Escuela de Minas que como concejales, con otras personas interesadas en el desarrollo de la ciudad, promovieron la idea de la municipalización.” (Santa-María págs. 252-253). Un trabajo reciente establece que entre 1920 y 1970 el 80 % de los dirigentes de EPM fueron egresados de la Escuela de Minas, cuyo modelo de gestión tuvo un acentuado carácter tecnocrático (González-Salazar pág. 9).

Cuando las secciones se integran para dar paso a EPM en 1955 (Botero-Herrera y Villegas-Botero), profesionales asociados a la Facultad de Minas continuaron apareciendo con mucha frecuencia, hasta hoy, en altos cargos directivos de la entidad, incluso varios de ellos en la gerencia general, así como en los diversos niveles técnicos de la misma. Conviene entonces referirse a algunas características de dicha entidad.

Aporte inicial del Municipio de Medellín. EPM recibió un aporte inicial del Municipio de Medellín en el año de su creación. El capital aportado por dicho municipio en 1955 fue \$ 67 millones, en tanto que el patrimonio de la entidad a finales de 2016 fue de \$ 20,6 billones. Como se ve, el aporte inicial ha sido multiplicado miles de veces, sin que se haya recibido capitalización adicional del Municipio de Medellín, el Departamento de Antioquia o la Nación. Al contrario, la entidad ha venido transfiriendo a su dueño una parte de sus

utilidades anuales, al punto de que en la actualidad las transferencias están contribuyendo en forma notable al plan de desarrollo de la ciudad.

Integración de servicios. Como un caso extraordinario en el mundo, EPM reunió en 1955 los servicios de acueducto, saneamiento, energía y telecomunicaciones, lo cual le permitió ciertas sinergias, integración de aspectos como la facturación y optimización de algunos costos gerenciales y administrativos. En los últimos años, la entidad se ha convertido en un complejo grupo empresarial con inversiones fuera del departamento de Antioquia e incluso en el exterior. Su sostenimiento y expansión ha sido resultado del buen manejo y de una cultura de pago y ahorro de los suscriptores. EPM ha mostrado que una empresa del sector público sí puede funcionar bien, sin clientelismo y sin corrupción.

La empresa colombiana del siglo XX. En 1999, EPM fue distinguida con el Premio Portafolio a la empresa colombiana del siglo XX. Once decanos de facultades de administración del país eligieron a EPM como la empresa del siglo por su historia vigorosa y trascendental para Antioquia y el país (Periódico El Tiempo) y por ser el mejor ejemplo de eficiencia, calidad y servicio al cliente.

Durante varios años, EPM fue la empresa de mayor patrimonio en Colombia. Sus fundadores y directivos han creado una cultura empresarial de lo público que es ejemplo en Latinoamérica, como lo han reconocido entidades multilaterales de crédito y otros prestamistas internacionales.

La gestión social. Gracias a la experiencia adquirida por EPM, en especial por las grandes dificultades derivadas de la inundación del antiguo casco urbano del municipio El Peñol en Antioquia (Fundación Codesarrollo), la entidad viene llevando a cabo estudios e intervenciones muy completas con respecto a las implicaciones sociales de las obras asociadas a los proyectos hidroeléctricos. En este campo se destaca la gestión social, mediante la cual se incorpora a las comunidades que se verán afectadas en la evaluación de los impactos que los proyectos tendrán sobre ellas y en el diseño e implantación de las soluciones integrales requeridas. El proyecto hidroeléctrico Porce II constituyó la experiencia piloto más representativa en este campo. Los ingenieros de EPM, muchos de ellos formados en la Facultad de Minas con la conciencia de las consideraciones sociales, tuvieron participación importante (Empresas Públicas de Medellín E. S. P. pág. 18).

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo agradece la colaboración que le brindaron Fabio Villegas-Gutiérrez, en especial con el suministro de información útil para el Numeral 3, Luis Fernando Múnera-López, Óscar Mesa-Sánchez y Germán Poveda-Jaramillo, así como la funcionaria de la Facultad de Minas, Diana Nazareth Ospina, quien proporcionó información relacionada con tesis y proyectos del posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.

REFERENCIAS

- Botero-Herrera, Fernando y Luis Javier Villegas-Botero. *Una mirada al pasado. Una visión de futuro*. Medellín: Empresas Públicas de Medellín, 2000. Impreso.
- Empresas Públicas de Medellín E. S. P. *Gestión social integral. Proyecto Hidroeléctrico Porce II*. Medellín: EPM, 2000. Impreso.
- Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. *Historia posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos 20 años (1984-2004)*. Medellín: Facultad de Minas, 2004. Impreso.
- Fundación Alejandro Ángel Escobar. *Ganadores ciencias*. s. f. Fundación Alejandro Ángel Escobar. Internet. 24 de Febrero de 2017. <<http://www.faae.org.co/html/ganadoresanoc.htm>>.
- Fundación Codesarrollo. *Desarrollo social con energía – La Central Hidroeléctrica Guatapé, factor de desarrollo*. Medellín: Codesarrollo, 2010. Impreso.
- González-Salazar, Natalia. *50 años de gerencia tecnocrática de los ingenieros de la Escuela de Minas de Medellín en las empresas de servicios públicos en Medellín 1920-1970*. 2014. Universidad EAFIT. Internet. 27 de Febrero de 2017. <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/2924/Natalia_GonzalezSalazar_2014.pdf?sequence=1>.
- Interconexión eléctrica S. A. *Estudio del sector de energía eléctrica*. 6 vols. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Agencia de Cooperación Alemana (GMZ), 1979. Impreso.
- Mejía, José Manuel, David R. Dawdy y Carl F. Nordin. «Streamflow simulation: 3. The broken line process and operational hydrology.» *Water Resources Research* 10.2 (1974): 242-245. Internet. 25 de Febrero de 2017. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR010i002p00242/full>>.
- Mesa-Sánchez, Óscar. *Comunicación personal*. Medellín, 2017. Correo electrónico.
- Múnera-López, Luis Fernando. «Aportes de la ingeniería antioqueña en los siglos XX y XXI.» *Foro presencia de Antioquia en la construcción del país*. Medellín: Universidad de Antioquia. Gobernación de Antioquia, 2013. 101-110. Impreso.
- Múnera-López, Luis Fernando y Orlando Sánchez-Echeverri. *Potencial hidroeléctrico de Antioquia-Inventario, perspectivas y estrategias*. Medellín: Banco de Iniciativas Regionales para el Desarrollo de Antioquia, 2011. Impreso.
- Periódico El Colombiano. *Energía de Colombia es una de las más competitivas del mundo*. 14 de Marzo de 2013. Internet. 26 de Febrero de 2017. <http://www.elcolombiano.com/historico/energia_de_colombia_es_una_de_las_mas_competitivas_del_mundo-DEEC_233437>.
- Periódico El Tiempo. «Un reconocimiento a los mejores.» *El Tiempo* 15 de Septiembre de 2003. Internet. 24 de Febrero de 2017. <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1027279>>.
- Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. *Proyectos*. 22 de Febrero de 2017. Abaco Small Business. Internet. 24 de Abril de 2017. <<http://valenciad.com/files/Proyectos.pdf>>.
- . *Tesis*. 22 de Febrero de 2017. Abaco Small Business. Internet. 24 de Abril de 2017. <<http://valenciad.com/files/Tesis.pdf>>.
- Poveda-Jaramillo, Germán. *Comunicación personal*. Medellín, 2014. Correo electrónico.
- Santa-María, Peter. «La Facultad de Minas y el reto al desarrollo: 1940-1960.» Santa-María, Peter. *Origen, desarrollo y realizaciones de la Escuela de Minas*. Vol. 1. Medellín: Ediciones DIKÉ, 1994. 2 vols. 165-282. Impreso.
- Unimedios. *Atlas hidrológico de Colombia*. s.f. Universidad Nacional de Colombia. Internet. 24 de Febrero de 2017. <<http://historico.unperiodico.unal.edu.co/ediciones/105/08.html>>.
- Valencia R., Darío y John C Schaacke Jr. «Disaggregation processes in stochastic hydrology.» *Water Resources Reseach* 9.3 (1973): 580-585. Internet. 25 de Febrero de 2017. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR009i003p00580/citedby>>.

- Valencia-Restrepo, Darío. «Avances en ciencia y tecnología propiciados por los proyectos hidroeléctricos.» *Cátedra Luis Antonio Restrepo Arango*. Ed. Darío Valencia-Restrepo. Medellín, 2007 (actualizado en 2016). 9. Internet. 22 de abril de 2017. <<http://www.valenciad.com/files/CiencTecnologProyHidroelec2.pdf>>.
- Valencia-Restrepo, Darío. «El desarrollo de las matemáticas en la Facultad de Minas de Medellín.» *Desarrollo histórico de las matemáticas y la ingeniería en Colombia en los siglos XIX y XX*. Ed. Luis Carlos Arboleda. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Memorias No. 14, 2015. 81-98. Impreso.
- . «La central hidroeléctrica Guadalupe I.» *Revista Credencial Historia* Agosto de 1999, 116 ed. Impreso. 25 de Febrero de 2017. <<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/agosto1999/116central.htm>>.
- . «La estadística en la Facultad de Minas (1940-1990).» *Revista Colombiana de Estadística* 25.No. 1 (2002): 5-14. Impreso.
- . «Los proyectos hidroeléctricos en Antioquia.» *Antioquia, Sociedad y Cultura*. Medellín: Cátedra Luis Antonio Restrepo Arango, 2007. DVD. Internet. 21 de Febrero de 2017. <<http://www.valenciad.com/Conferencias/ProyHidroelAnt.pdf>>.
- Villegas-Gutiérrez, Fabio. *Comunicación personal*. Medellín, 2007.