

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA



EVOLUCIÓN HISTÓRICA

2.1. Reseña Histórica

En hidrología se usan métodos planteados por diferentes autores; por tanto, es importante tener en cuenta su desarrollo histórico, a fin de formarse una idea panorámica del espacio, el tiempo y la ruta a seguir. *"El conocimiento pasado puede ayudar a solucionar los problemas actuales de escasez de agua"* (Eichmann, 2016).

La mayoría de los autores presentan bosquejos históricos similares sobre el desarrollo de la hidrología; no obstante, el más completo es el de Campos (1992), quien divide el desarrollo histórico de la hidrología en ocho etapas o períodos—tal como se muestra en la Figura 2.1—, los cuales se diversifican de la siguiente forma: Período de Especulación (antigüedad mayor a 1400), Período de Observación (1400 a 1600), Período de Medida (1600 a 1700), Período de Experimentación (1700 a 1800), Período de Modernización (1800 a 1900), Período de Empirismo (1900 a 1930), Período de Racionalización (1930 a 1950), Período de Teorización, Globalización y Virtualización (1950 a la fecha).

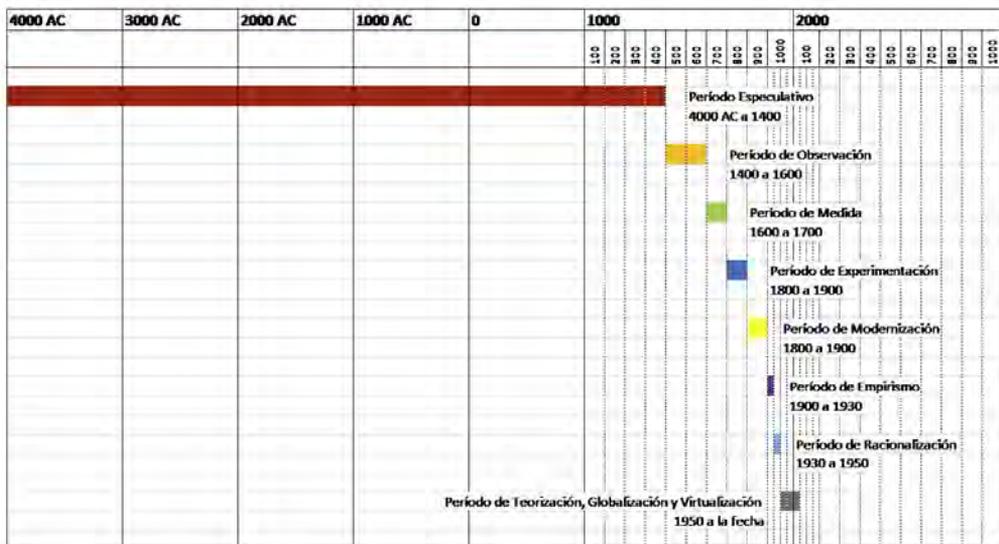


Figura 2.1. Períodos o etapas de desarrollo de la hidrología (Campos, 1992)

2.2. Período de Especulación (antigüedad mayor a 1400)

En la antigüedad se especuló sobre la hidrología y el ciclo hidrológico. Muchos filósofos sostuvieron ideas y posiciones diversas sobre su concepción, entre ellos tenemos a Homero, Tales, Platón y Aristóteles en Grecia; Séneca y Plinio en Roma. Antes bien, gran parte de estos conceptos fueron erróneos.

El agua subterránea es de interés general y de suma importancia. Durante varios miles de años, los pozos de agua se han utilizado. La Biblia cuenta de Abraham e Isaac cavando estos pozos en forma exitosa. Sin embargo, ha existido un misterio considerable relacionado con la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas. Incluso hoy el tema está conectado con mucha superstición popular y desinformación (Bader, 1938).

2.2.1. Cultura Americana

En el continente americano, en varios lugares, especialmente de las partes altas de la cordillera de los Andes entre Perú y Ecuador, existen elementos que nos dan indicios del manejo del agua; entre estos tenemos las fortificaciones, miradores, reservorios y otras evidencias de culturas preincaicas (Hofstede et al., 2003). En el Perú existieron más de treinta culturas pre incas, concebidas bajo la forma de ciudades plenamente establecidas como una civilización desarrollada para la época: gobernante, autoridades, súbditos, tecnología agrícola, tecnología textil, tecnología metalúrgica, tecnología de construcción, clases sociales, religión, etc. Caral es cultura madre de las civilizaciones del mundo, equivalente a Egipto y Mesopotamia (El Comercio, 2014). Las fechas de radiocarbono del sitio de Caral —ubicado en el valle de Supe, a 182 kilómetros al norte de Lima, Perú— indican que la arquitectura corporativa monumental, el asentamiento urbano y la agricultura bajo riego comenzaron en las Américas unos 5000 años antes del presente (2627 a.C. hasta 1977 a.C.) (Solis, Haas & Creamer, 2001).

En América del Sur, especialmente en la región de los Andes occidentales, la captación y la provisión segura de agua ha sido, es, sigue y seguirá siendo un desafío muy exigente debido a una situación geográfica específica. Las civilizaciones precolombinas ancestrales lograron importantes soluciones de abastecimiento de agua y saneamiento asegurando la sostenibilidad en los mismos hábitats naturales, difíciles hoy de alcanzar sin la ayuda de los recursos modernos de nuestros tiempos. La economía se basaba en la agricultura y la pesca. Cultivos y productos eran intercambiados por

pescado y viceversa (Figura 2.2). La gente de Caral cultivó tierras planas y terrazas de construcción especial; construyeron y operaron sistemas de irrigación de canales provistos de agua de río y de manantiales (Angelakis, Mays, Koutsoyiannis & Mamassis, 2012).



Figura 2.2. (a) Ciudadela Caral. (b) Protección de riberas en Caral (EDITORIA, 2017)

Shady, arqueóloga peruana descubridora de Caral, señala que en ingeniería hidráulica esta civilización creó la "amuna" o río subterráneo, el cual lleva el agua a través de canales hasta lugares geológicamente permeables. Explicó que, con este método de irrigación, se "siembra el agua" y se evita su evaporación. De esta forma, el agua es almacenada naturalmente y puede ser aprovechada en puquios o manantiales a lo largo de una cuenca, para asegurar así la campaña agrícola y la supervivencia de la población (Coello, 2016). Afirma, además, que los antiguos peruanos estaban adelantados en, por lo menos, seis siglos a Europa y el resto de América en cuanto a conocimientos de ingeniería hidráulica, civil, estructural y agrícola.

La cultura Nasca (700 a.C. - 200 d.C.) suscitó con sus geoglifos diversas hipótesis, de las cuales aparece una hidrológica. El hidrólogo Stephen Mabee y el arqueólogo Donald Proulx sostienen que las líneas indican la presencia de corrientes subterráneas de agua de muy buena calidad. Esta teoría también requiere mayor trabajo y desarrollo para lograr una correlación más significativa entre depósitos encontrados de agua subterránea y las líneas. Por ahora se tiene ideas preliminares sobre la relación de los puquios, las aguas subterráneas y los canales encontrados en forma paralela al río (McClintock, 2000). Aunque algunos expertos expresan su escepticismo de que una cultura como esta hubiera tenido

los conocimientos técnicos para encontrar y mapear las fuentes de agua subterránea, un número creciente de estudiosos actualmente están convencidos de que el agua es la clave para resolver el enigma de las líneas de Nasca. Una reciente investigación sobre las líneas de Nasca indica que fueron creadas para identificar la ubicación de pozos y puquios de agua provenientes de los Andes y que llegaban hasta las zonas desérticas de la costa peruana (Figura 2.3). Esto lo señala David Johnson, historiador norteamericano de National Geographic, quien asegura que figuras como triángulos o trapecios tienen relación con la ingeniería hidráulica de nuestros antepasados (La República, 2010).



Figura 2.3. Acueductos de Cantaloc, Nasca (Vargas, 2013)

En la cultura Maya pueden identificarse tres períodos: Pre clásico (1500 a.C. - 250 d.C.), es el período de formación, durante el cual la población creció, la agricultura desarrolló nuevas técnicas y aparecieron gobernantes que fueron evolucionando a partir de poderosos líderes espirituales. Clásico (250 d.C. - 900 d.C.), período caracterizado por el surgimiento de las ciudades-estado gobernadas por reyes poderosos, quienes adoptaron un sistema jerárquico de gobierno. Y, finalmente, el período Post clásico (900 d.C. - 1200 d.C.), caracterizado por la caída de la civilización Maya, cuando los gobiernos se vieron altamente segmentados y, por razones en su mayoría aún desconocidas para nosotros, los mayas abandonaron las ciudades ubicadas en Yucatán (Staff Agua & Ambiente, 2015). Gran parte de la religión y cultura de esta civilización fueron

orientadas hacia el aprovechamiento del agua y su obtención. Los sacrificios así como las plegarias, realizados por los sacerdotes mayas al dios Chac, tenían esta finalidad; por tanto, se deduce que esta civilización era muy dependiente de los recursos hidráulicos (Figura 2.4).



Figura 2.4. Acueducto en Palenque Maya (Agua & Ambiente, 2015)

Con respecto a la cultura incaica (1099 – 1538), un breve resumen de los principales períodos históricos ocurridos en el Perú pone en evidencia los más de 5000 años de convivencia armónica con la naturaleza, que tuvieron nuestros antepasados; frente a los escasos 90 años de desarrollo agrícola actual, cuya fecha de partida se da en el año 1930 con la creación de la DGAS-Dirección General de Aguas. En definitiva, aquella convivencia natural y la veneración a los astros y los recursos naturales, como parte de su cosmovisión, hicieron que usaran de manera armónica y respetuosa su entorno, el agua y el suelo (Ancajima, 2014). En esta cultura se identificó el desarrollo de siete grandes sistemas: Sistemas de Producción, Sistema de Represas Altoandinas, Sistema de recarga de acuíferos – Amunas, Sistema de Andenes, Sistemas de Riegos, Sistema de Acueductos y Sistema de Cochas.

Sistemas de producción: Una gran red de movimientos de tierra (waruwaru es su nombre local) cubre el territorio cerca del lago Titicaca (Figura 2.5), siendo muestra del esfuerzo agrícola de los antiguos pueblos andinos, casi inimaginable en toda su magnitud (Sparavigna, 2013). La gente creó un sistema de campos sobresalientes, que eran grandes plataformas elevadas de plantación, con los canales de drenaje correspondientes para mejorar las condiciones del suelo.



Figura 2.5. Área de Machacamarca, con una colina adosada, waru-waru y un canal en forma de serpiente (Sparavigna, 2013)

Sistema de Represas Altoandinas: A lo largo de los Andes podemos apreciar una serie de represas, que por su ubicación denominamos alto andinas; son de mediana capacidad y su función era almacenar el agua de las lluvias. En ellas se verifican capacidades que van desde unos cientos de miles de metros cúbicos hasta cerca del millón de metros cúbicos. Dichas represas nunca estuvieron posicionadas en los cauces de los ríos; contrariamente a lo que sucede en la actualidad, donde vemos represas de gran capacidad en el eje del río (Ancajima, 2014). Aquellas revelan una gran ingeniería hidráulica a través del buen conocimiento de las cuencas, utilizadas muchos siglos antes de que se formará el Imperio del Tahuantinsuyo. Es necesario rescatar y reutilizar tan sabia experiencia que aún no ha sido superada por la ciencia y tecnología actual (Figura 2.6).



Figura 2.6. (a) Represamiento inca Saquicocha. (b) Negra Huacanan (Ancajima, 2014)

Sistema de Recarga de Acuíferos – Amunas: Tiene una presencia mayor en la sierra de Lima; se trata de una práctica ancestral de recarga de acuífero, que ahora se muestra como novedosa. Este es el mejor ejemplo de la llamada "siembra del agua". Consistía en un ritual que implicaba asambleas, limpieza de acequias y, sobre todo, veneración al agua. Antes del inicio de la limpieza de las acequias amunadoras se realizaba el pago a la tierra (apu) y al agua (yaku) (Ancajima, 2014).

El sistema funcionaba con zanjas abiertas siguiendo las curvas de nivel de las punas, lo que facilitaba conducir el agua de lluvia hasta un lugar llamado cochas, las cuales fueron abiertas con la finalidad de recibir el agua y permitir que esta se filtrara luego en la montaña para surgir algunos meses después aguas abajo, como puquios, precisamente durante el tiempo en que no hay lluvias y el estiaje es mayor en la cuenca. De esa manera realizaron eficazmente su agricultura y mantuvieron al pueblo provisto de alimentos (Figura 2.7).



Figura 2.7. Amuna de Huerochiri

Sistema de Andenes: Según Luis Masson Meiss, estudioso de los sistemas de andenería, en el Perú existe aproximadamente un millón de hectáreas en andenes (Olarte, 1999). De todos ellos, solo se explotan efectivamente el 25%. Pese a su importancia, todavía no se cuenta con un inventario actualizado y confiable de esta gran obra de ingeniería, legada por los incas. Lamentablemente, se olvida que constituyen un patrimonio cultural como son, por ejemplo, los andenes de Andamarca en Lucanas, Ayacucho, Tipón y Moray en Cusco (Figura 2.8).

Así mismo, en Maras se ubican unas salineras conformadas por pozas construidas con andenes, lo cual da muestra de un uso diferente al de producción que usaron los incas. Este sistema se ideó para almacenar las aguas saladas y posteriormente, por efecto de la evaporación, dejar en su suelo capas de sal que pudieran ser recogidas (Figura 2.9).



Figura 2.8. (a) Sistema de andenes en Tipón. (b) Moray – Cusco (Ancajirna, 2014)



Figura 2.9. Los andenes de Maras, contruidos para almacenar las aguas saladas (Ancajima, 2018)

Sistemas de riegos: Son innumerables los vestigios de grandes obras hidráulicas como los canales de riego que, muchas veces, cruzan los Andes llevando las aguas de una cuenca hacia otra (trasvases), con mejores posibilidades o potencial agronómico: suelo, clima, adaptación de especies, entre otros aspectos. Un gran ejemplo lo constituye el canal Cumbemayo, que es parte de una de las obras hidráulicas más importantes. Se trata de unos bloques tallados por los cuales discurre agua en una suave pendiente, que incluye túneles y codos en zigzag para aminorar la velocidad de la corriente. Los bloques de piedra ubicados al inicio del recorrido —los petroglifos propiamente dichos— tienen diversos planos tallados y pulidos (Ancajima, 2014) (Figura 2.10).



Figura 2.10. (a) Canal Cumbemayo, "tallado" en piedra.
(b) Andenes en el Valle Sagrado de los Incas, Pisac («Agricultura inca», s. f.)

En las siguientes figuras (2.11) se registran los canales de abastecimiento de agua en la ciudadela de Machu Picchu.

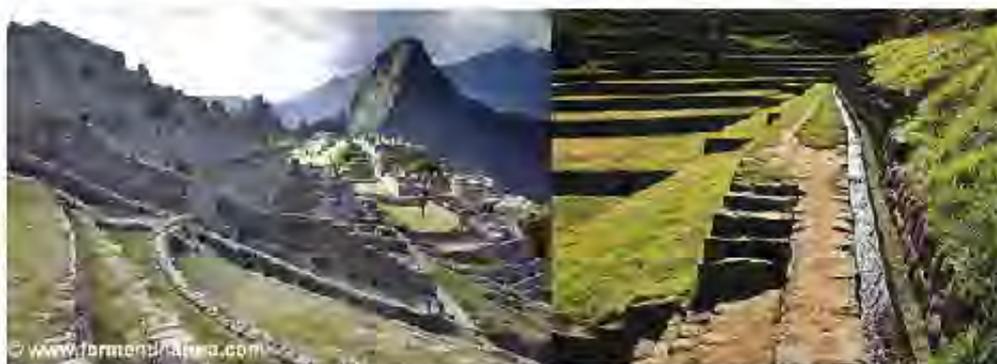


Figura 2.11. Canales de abastecimiento de agua, Ciudadela de Machu Picchu (Natura, 2013)

En el periodo inca se continúa el aprovechamiento de las tierras del desierto impulsándose el desarrollo de las laderas y de las quebradas de los cerros en la sierra, mediante la construcción de andenes. Se aprovecha al máximo el agua—símbolo de vida—evitando su desperdicio y mal uso. Existían penas muy severas para quienes alterasen el reparto. La limpieza anual de los canales era una tarea obligatoria, el curaca o cacique era el responsable de organizar estas labores, acompañado por el "varayoc" o alcalde.

2.2.2. Cultura Griega

La única sustancia conocida por los antiguos filósofos en sus estados sólido, líquido y gaseoso era el agua. Por lo tanto, aparece prominentemente en teorías tempranas sobre el origen de la Tierra y cómo funciona esta. Tales de Miletus (624 a.C. - 545 a.C.) afirmaba que el agua era la sustancia esencial de la Tierra (Figura 2.12), asimismo, manifestó en sus escritos que los manantiales y los ríos eran alimentados por las aguas del océano; las cuales se introducían en las entrañas de la tierra y, bajo la presión de las rocas, ascendían hasta la superficie, dando lugar a los manantiales (Sánchez, 2017). Platón (427 - 347 a.C.), en su diálogo titulado *Fedón*, describe cómo todas las aguas de la superficie de la Tierra: mares, lagos, ríos y manantiales proceden de una enorme caverna llamada "Tartarus", a donde todas las aguas libres de la superficie de la Tierra vuelven tras haber recorrido diversos e intrincados caminos.

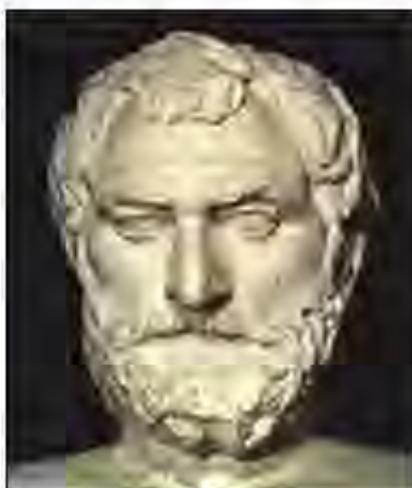


Figura 2.13. Tiroles de Mileto
(O'Grady, s. f.)

Aristóteles (384 - 322 a.C.), discípulo de Platón, profundizó con su pensamiento racional más que su maestro y sus antepasados en los procesos por los cuales el agua del mar podría llegar a perder su salinidad y aparecer en los manantiales. Esto lo llevó a sospechar que el agua de los manantiales no debía derivar probablemente del mar sino de una emanación permanente en forma de vapor, procedente del interior de la tierra que al ascender a los niveles superiores se condensaría y, a través de una intrincada red de poros y conductos, alcanzaría la superficie del suelo dando lugar a los manantiales (Figura 2.13) (Ross, 1923).

Desde la más remota antigüedad se tiene constancia de la observación de los cambios en el clima, relacionando el movimiento de los astros con las estaciones del año y con los fenómenos atmosféricos. Los antiguos egipcios asociaban los ciclos de crecida del Nilo con los movimientos de las estrellas, explicados por los movimientos de los dioses; mientras que los babilonios predecían el tiempo guiándose por el aspecto del cielo. Sin embargo, el término "meteorología" proviene de *Meteorológica*, título del libro escrito alrededor del año 340 a.C. por Aristóteles, quien presenta observaciones mixtas y especulaciones sobre el origen de los fenómenos atmosféricos y celestes.



Figura 2.13. Aristóteles (Kenny, s. f.)

Anaximander de Miletus (610 a.C. - 545 a.C.) sostuvo que el agua era, posiblemente, la fuente de la vida (Figura 2.14). Fue un filósofo griego seguidor de Tales de Mileto e hijo de Praxiades de Mileto. Una de las peculiaridades relevantes de este filósofo es ser el autor del primer libro en prosa que se ha descubierto. No se conoce la fecha precisa de su nacimiento; no obstante, existe cierto consenso en señalar que nació alrededor del año 610 a.C. Además de dedicarse a la filosofía, Anaximander también fue astrónomo, geómetra y estratega militar.



Figura 2.14. Anaximander de Miletus (Couprie, s. f.)

En el sistema propuesto por Empédocles de Agrigentum (490 a.C - 430 a.C.), el agua compartía la primacía que Thales le había dado con otros tres elementos: fuego, aire y tierra (Figura 2.15) (Bayden, 2016).



Figura 2.15. Empédocles de Agrigentum (Campbell, s. f.)

Anaxágoras de Clazomene (500 a.C - 428 a.C.) da la primera versión del ciclo hidrológico. Creía que el sol evaporaba el agua hacia la atmósfera, caía como lluvia y se creaban reservas subterráneas que luego alimentaban a los ríos (Figura 2.16).



Figura 2.16. Anaxágoras de Clazomene (Patzla, s. f.)

Theophrastus (371 a.C. - 287 a.C.) explica, de forma lógica, la precipitación por medio de la condensación y el congelamiento (Figura 2.17) (Nace, 1970).



Figura 2.17. *Vitruvius* (Audiencia, s. f.)

2.2.3. *Cultura Romana*

Según la concepción actual, Marcus Vitruvius Pollio (80-70 a.C. - 15 a.C.) formuló una propuesta correcta estableciendo que el agua subterránea provenía de la infiltración de la lluvia y de la nieve. Asimismo, senta las bases para la prospección del agua subterránea ubicando lugares donde debería excavarse. Uno de sus aportes más importantes fue asociar diferentes cantidades y calidades de agua subterránea con diferentes tipos de rocas y situaciones topográficas (Figura 2.18) (Bayden, 2016).

Vitruvius dedicó su octavo libro a la hidrología y la forma de utilizar el agua para el abastecimiento de las edificaciones; en él escribe: "Dado que es de opinión general entre fisiólogos, filósofos y sacerdotes el que todas las cosas proceden del agua, juzgo que es necesario—de igual modo que hice en los siete anteriores libros en lo referente a las reglas para la construcción de edificios— describir en el presente el método de buscar aguas y las diferentes propiedades de éstas de acuerdo con la naturaleza de cada región ...". Más adelante indica: "Los árboles, que crecen en gran número sobre los montes, contribuyen a la acumulación de la nieve durante largas épocas, cuando ésta comienza su fusión empieza a infiltrarse lentamente bajo el suelo, y es esta misma agua, la infiltrada, la que, al llegar subterráneamente al pie de las montañas, da lugar a los manantiales". Cita, además, en dicho texto, una lista de plantas "que sirven para indicar la presencia de agua en el suelo", y da algunos consejos al respecto (Perrault, 1761). Vitruvius, en su octavo libro, incluye

temas como: Maneras de descubrir el agua, el agua de lluvia, cualidades naturales de las distintas aguas, pruebas para comprobar la salubridad de las aguas, modo de nivelar las aguas, y, conducción y captación de las aguas.

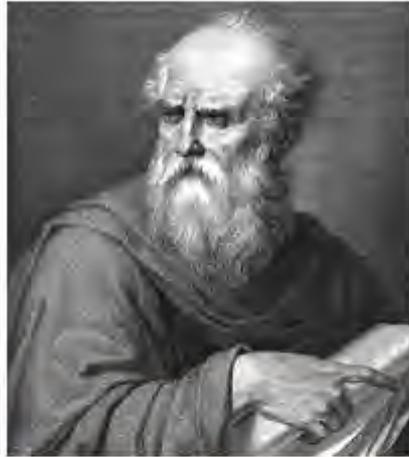


Figura 2.18. Marcus Vitruvius Pollio (Enciclopedia Biográfica en Línea, s. f.)

En el puente romano (Figura 2.19), consideran estructuras de apoyo que en las conducciones de agua soportan el canal sobre el terreno mediante arcadas, obras que denominamos acueductos, y puede aplicarse también a toda conducción en sentido general (Fernández, 1971).



Figura 2.19. (a) Acueducto Romano, (b) Excavación de túneles (National Geographic, 2014)

La mayoría de los filósofos romanos siguieron, en general, el pensamiento de los griegos. Por ello, sabemos que Lucrecio y Plinio adoptaron —en el mismo sentido que Tales o Platón— la idea de que el agua del mar era la fuente directa primordial que alimentaba a los grandes manantiales. SÉNECA (3 a.C. - 65 d.C.) comulgó, por su parte, con la idea de la condensación de Aristóteles (Martínez, 1972).

Lucrecio (99 a.C. - 55 a.C.), en el libro VI de su "De Rerum Natura", plantea y describe la idea del ciclo hidrológico en donde el agua se evapora desde la superficie de la tierra y del mar para retornar posteriormente en forma de precipitaciones. En el libro V, sin embargo, opinaba que el origen de las aguas subterráneas es el mar, desde allí circulaban por el interior de la tierra hasta alcanzar los manantiales (Lucretius & Humphries, 1969). Los romanos dieron gran importancia al valor del agua, como así lo demuestran las numerosas obras de captación, conducción y abastecimientos que construyeron, fruto de una depurada técnica.

A este período pertenecen las grandes construcciones hidráulicas de la antigüedad, las cuales requirieron un conocimiento hidrológico práctico; entre ellas se encuentran los qanats de Persia, los acueductos de Roma, los canales y sistemas de irrigación y obras de control de inundaciones en China y las zonas de riego de Egipto, Mesopotamia e India.

2.2.4. *Cultura Persa*

Según la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO] (2014):

En el conjunto de las regiones áridas de Irán, la agricultura es sostenida por el antiguo sistema de riego de los qanats, que toman el agua de los acuíferos en lo alto de los valles y la hacen circular por túneles subterráneos que a menudo miden varios kilómetros. Los once qanats que componen este sitio y representan este sistema comprenden también zonas de reposo para los trabajadores, depósitos de agua y molinos hidráulicos. Este sistema tradicional de gestión del agua todavía funciona y permite un reparto equitativo y sostenible del recurso. Los qanats aportan un testimonio excepcional de las tradiciones culturales y las civilizaciones de zonas desérticas de clima árido. (Figura 2.20).



Figura 2.20. Qanats de Persia (UNESCO, 2014)

2.2.5. Cultura China

Durante los reinados del Emperador Amarillo, el Emperador Yao y el Emperador Shun, el pueblo chino sufrió mucho debido a las graves inundaciones que amenazaban sus vidas; en tanto todos los emperadores trataban, infructuosamente, de hallar soluciones para controlar la fuerza arrasadora del agua (Wu, 2015). El enfoque de Yu era diferente al de su padre. Observó y aprovechó la naturaleza del agua que la hace fluir hacia abajo, creando canales de dragado de acuerdo a las funciones propias del territorio para dirigir los nueve flujos de agua hacia el mar. Después de trece años de duro trabajo, las inundaciones fueron controladas. (Figura 2.21).

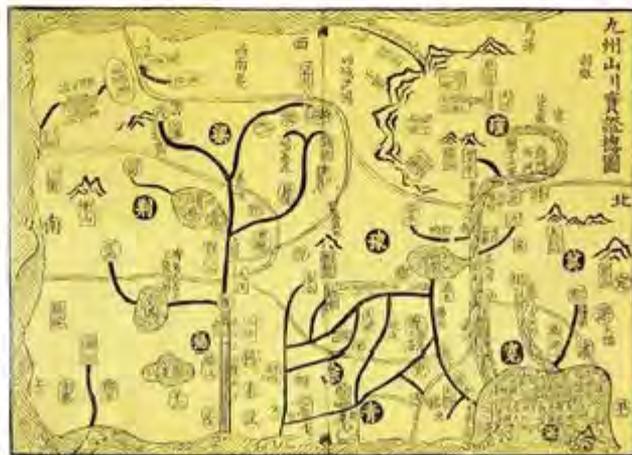


Figura 2.21. Sistema de Zhou, atribuido a Shun (Wu, 1982)

El libro de Tolman, titulado *Ground Water* y publicado en 1937, tiene muchas descripciones importantes referidas a las hazañas hidrogeológicas de los pueblos orientales antiguos, lo que pone de manifiesto la gran necesidad de contar con las aguas subterráneas en algunas de estas civilizaciones. Fue hasta mediados del siglo XIX cuando se volvió a igualar las marcas de profundidad logradas por las perforaciones de estos pueblos de la antigua China (Tolman, 1937).

2.2.6. Cultura Egipcia

Se sabe que los egipcios desarrollaron una forma de gestión del agua llamada irrigación de cuencas, basada en el ascenso y caída natural del río. Construyeron una red de bancos de tierra, algunos paralelos al río y otros perpendiculares a él, que formaban terrazas de diversos tamaños (Figura 2.22). Las compuertas reguladas servían para dirigir el agua de la inundación a una cuenca, donde permanecía durante un mes aproximadamente hasta que el suelo estuviera saturado. Luego, el agua restante era drenada a una cuenca de pendiente descendente o a un canal cercano, que los agricultores de la parcela drenada utilizaban para la siembra de sus cultivos (Postel, s. f.).



Figura 2.22. Riego en la cultura egipcia (Colin, 2008)

En su apogeo, la inundación cubría toda la planicie de inundación a una profundidad de 1.5 metros; esto se registraba usando los nilómetros, medidores de nivel construidos para registrar la cantidad de agua en el río Nilo (Figura 2.23). Las aguas comenzaban a retroceder en el sur a principios de octubre y, a fines de noviembre, la mayor parte del valle estaba seco. Los granjeros egipcios tenían ante sí campos bien irrigados, los cuales habían sido fertilizados de manera natural por el rico limo transportado desde las tierras altas de Etiopía y depositado en la llanura de inundación, a medida que el agua se extendía sobre él (Butzer, 1976).



Figura 2.23. Nilómetros para registro de niveles del río (Pascak, a. f.)

2.3. Período de Observación (1400 a 1600)

En este período, se tuvo un cambio gradual de los conceptos filosóficos puros de la hidrología a la ciencia observacional. Basándose en observaciones, Leonardo da Vinci y Bernard Palissy lograron una acertada comprensión del ciclo hidrológico, especialmente en lo relativo a la infiltración de la lluvia y retorno del agua a través de manantiales.

2.3.1. Leonardo da Vinci

Leonardo da Vinci (1452 - 1519) abordó el conocimiento científico con la mirada del artista. Sus estudios de las formas vivas y de las inertes lo convierten en un precursor del enfoque empírico y sistemático de la observación de la naturaleza, lo que hoy se conoce como método

científico (Capra, 2008). Leonardo da Vinci midió la distribución de velocidad de flujo en la sección transversal de una corriente, mediante la repetición de experimentos. Liberaba una vara lastrada, que era mantenida a flote por medio de una vejiga animal inflada y la seguía mientras avanzaba aguas abajo, midiendo la distancia con un odómetro y el tiempo con canciones rítmicas (Chow et al., 1988) (Figura 2.24).



Figura 2.24. Procedimiento de medición de velocidades Leonardo da Vinci (Chow et al., 2008)

2.3.2. Bernard Palissy

Bernard Palissy (1510 – 1589), calvinista francés que nunca recibió una educación académica formal, nacido en Saintes y educado en un ambiente humilde, es uno de los precursores de la geología y de la hidrogeología (Martínez, 1972). Palissy fue un gran filósofo naturalista que desde muy joven mostró un vivo afán por observar la naturaleza. Todas sus teorías fueron fruto de sus propias observaciones. Como él mismo dice en sus escritos: "no he tenido nunca otros libros que el cielo y la tierra, cuyas páginas están abiertas a todos". A partir de 1575 Palissy dio clases de Historia Natural y cinco años más tarde, en 1580, publicó en francés —hecho que en aquella época contrariaba la costumbre de publicar todos los trabajos científicos y filosóficos en latín— su

además, durante todos los tiempos, todos los hombres así lo creyeron. Supone una gran presunción por parte de Ud. intentar ahora hacerme creer una doctrina totalmente nueva, como si Ud. fuera el más clarividente filósofo de todos los tiempos".

A lo que la "Práctica" responde:

"Si yo no estuviera bien respaldada en mis afirmaciones, Ud. me habría avergonzado con sus palabras; sin embargo, no me han inquietado lo más mínimo ni su dura crítica ni sus refinadas palabras, porque estoy completamente segura de que le convencerá a Ud. y a todos aquellos que como Ud. opinan, aunque entre ellos están Aristóteles y los mejores filósofos que jamás hayan existido, pues tan convencida estoy de que mi opinión es correcta".

Este libro va desarrollando a través del diálogo, el siguiente argumento: la "Teoría" defiende primero la hipótesis tradicional del agua subterránea procedente del mar y, después, la de la condensación; mientras que la "Práctica", con claros y válidos argumentos, muestra lo absurdo de cada una de estas hipótesis, presentando hechos sencillos, pero convincentes, que demuestran a la "Teoría" que toda el agua de los manantiales y de los pozos procede, en efecto, de las lluvias.

A pesar de las honrosas excepciones citadas, las ideas erróneas acerca del origen de las aguas subterráneas continuaron prevaleciendo hasta finales del siglo XVII. Solo así puede explicarse que, durante esta época, científicos tan influyentes como el famoso astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630), el padre jesuita Atanasius Kircher (1602-1680) y el propio René Descartes (1596-1650) no solamente concedieran crédito a las teorías de los antiguos griegos; sino que, además, las ilustraran y divulgaran con aportaciones suyas, fruto de una fantasía inaudita en científicos de su categoría (Martínez, 1972). Así pues, Kepler, en sus escritos no supo decir otra cosa sobre el origen de las aguas subterráneas que comparar la tierra a un enorme animal que tragaba el agua del mar y la digería, siendo el agua dulce de los manantiales el producto final de su metabolismo.

2.4. Periodo de Medición (1600 a 1700)

El siglo XVI puede ser considerado como el inicio de la moderna ciencia de la hidrología, con las mediciones, por ejemplo, de Pierre Perrault y Edmé Mariotte en el río Sena de París y Edmond Halley en el mar Mediterráneo; los cuales llegaron a conclusiones correctas del fenómeno hidrológico estudiado. A este período corresponden también los primeros estudios de los pozos artesianos.

2.4.1. Athanasius Kircher

Athanasius Kircher S.J. (1601 – 1680) expuso sus ideas sobre el agua en su obra *Mundus Subterraneum* (Figura 2.26), publicada en 1664. Estas ideas son también de una imaginación espectacular: para Kircher los manantiales serían los desagües naturales de unos grandes sistemas de cavernas que existirían por debajo de todas las montañas de la Tierra, las cuales conectarían con el mar por medio de enormes conductos subterráneos. Los grandes remolinos que se observan en algunas costas nórdicas fueron considerados por Kircher como la manifestación palpable del emplazamiento de las bocas de esos supuestos grandes conductos, tal como muestran los dibujos explicativos que acompañan a su obra, la cual conoció una gran divulgación debido a que llegó a constituir un tratado clásico de geología para los estudiantes de la época (Kircher, 1664).



P. ATHANASIVS KIRCHERVS FVLVDENSIS
Societ. Iesú. Anno aetatis LIII.
Mariae & Maximiliani Imperatorum DD. et Illustriss. Principis & Marchionis

Figura 2.26. Athanasius Kircher S.J. (Bluemaert, s. t.)

2.4.2. Jean François

El padre jesuita Jean François (Figura 2.27), maestro de Descartes, escribió en 1665 su *Arts des Fontaines et Science des Eaux* donde, pese a la admiración que le profesaba a su discípulo, manifestó su completo desacuerdo con este sobre la idea de que el agua de los manantiales venía directamente del agua del mar y depositaba su salinidad en el interior de la tierra para luego volver a aparecer en la superficie, desde donde escurría de nuevo al mar (François, 1665). Por el contrario, François entendía que los manantiales de las aguas proceden de los vapores formados sobre la tierra y sobre el mar, es decir, de las lluvias y de las nieves fundidas que penetran en la tierra, salen y, al salir, dan lugar a nuevos manantiales.



Figura 2.27. *Arts des Fontaines et Science des Eaux*, Jean François (París, 1665).

2.4.3. Pierre Perrault

Pierre Perrault (1608 – 1680), miembro de una familia burguesa de provincias cuyas raíces se encontraban en la región de Touraine en Francia, creció y murió en París. Como todos sus ilustres hermanos, se caracterizó también por su brillantez y su diversidad. Aunque fue formado

como abogado, se inclinó hacia las finanzas y se elevó a un alto cargo bajo el reinado de Luis XIV. Debido a su ingenuidad política y a cierta imprudencia financiera, cayó en desgracia, por lo que se declaró en quiebra. Posteriormente, convertido en científico aficionado, escribió un libro sobre el origen de los manantiales que rompió casi por completo con el autoritarismo tradicional de 2000 años, y estableció la hidrología en el camino moderno de la observación y el experimento directo. En este libro desarrolló el concepto del ciclo hidrológico, explicando correctamente la disposición de la lluvia por evaporación, transpiración, recarga de agua subterránea y escorrentía. Algunas de sus ideas sobre procesos específicos fueron erróneas; sin embargo, aun cuando estaba equivocado, sus errores se sustentaban en una estructura bastante lógica. Gran parte de su contribución a la base de la hidrología científica ha sido pasada por alto o distorsionada tanto por historiadores como por hidrólogos (Figura 2.28) (Nace, 1974).



Figura 2.28. Pierre Perrault en 1654 (Broussier, 2005)

El libro de Perrault sobre el origen de los manantiales (1674) en su primera mitad—146 páginas—, contiene una revisión exhaustiva de las mejores teorías y explicaciones conocidas a la fecha. Los autores discutidos por Perrault son Platón, Aristóteles, Epicuro, Vitruvius, Séneca, Pliny, Thomas de Aquino, Scaliger, Cardano, Dobrzenski, Van

Helmont, Lydiat, Davity, Descartes, Papin, Gassendi, Du Hamel, Shottus, Rohault, Francois y Palissy. En primer lugar, Perrault ofrece una breve descripción de las principales características de las teorías propuestas por cada uno de estos autores, luego desarrolla su propia crítica y expresa sus razones para el rechazo (Brutsaert, 2005).

Registró, además, medidas de la escorrentía superficial y encontró que esta correspondía a una fracción de la lluvia; de este modo, dedujo que la lluvia era una fuente para la escorrentía. Así también, acertó en que el resto de la precipitación se perdía por transpiración, evaporación y desviación (Chow et al., 1988).

2.4.4. Edme Marriotte

Edme Marriotte (1620 - 1684), a partir de sus estudios de plantas, concluyó que estas sintetizan materiales por procesos químicos que varían de una especie a otra; una teoría verificada mucho después de su tiempo. Observó, asimismo, la presión de la savia en las plantas y la comparó con la presión arterial en los animales. El primer volumen de la *Histoire et mémoires de l'Académie des sciences* (1733), traducida como *Historia y memorias de la academia*, contiene muchos documentos sobre los siguientes temas: el movimiento de fluidos (Figura 2.29), la naturaleza del color y las notas de la trompeta (Enciclopedia Británica, s. f.).



Figura 2.29. (a) Edme Marriotte. (b) Libro *El movimiento del agua y otros fluidos* (Desaguliers, 1718)

En el libro *El movimiento del agua y otros fluidos*, se trata temas referidos al origen de los manantiales, las objeciones sobre el génesis de estos, observaciones sobre el aumento y la disminución de algunos manantiales, observaciones sobre la cantidad de agua de lluvia y un cálculo del agua requerida para diferentes suministros (Desaguliers, 1718).

2.4.5. Edmund Halley

Edmund Halley (1656 – 1742), aunque había iniciado su carrera científica como astrónomo, fue uno de los primeros en estimar la evaporación que ocurría en los océanos. Para ello, extrapola los datos obtenidos al medir la cantidad evaporada de un recipiente, con ese valor calculó la que se evaporaría en el Mediterráneo; de esta forma, llegó a la conclusión de que esta evaporación era suficiente para abastecer de agua a todos los ríos que desembocaran en el océano (Shifter, 2013a).

En 1688, Halley propuso por vez primera la necesidad de realizar un mapa de vientos a escala planetaria, una idea realmente atrevida y adelantada a su época, visto desde nuestra privilegiada perspectiva histórica. Esta propuesta no encontró eco positivo sino hasta 1735, cuando George Hadley propuso un modelo general de circulación atmosférica; la Meteorología se aproximaba así a sus patrones actuales.

Los progresos en el campo meteorológico se centraron en que nuevos instrumentos, más precisos, se desarrollaran y pusieran a disposición de los avances en esta materia. Galileo construyó un termómetro en 1607, seguido de la invención del barómetro por parte de Evangelista Torricelli en 1643. El primer descubrimiento de la dependencia de la presión atmosférica, en relación a la altitud, fue realizado por Blaise Pascal y René Descartes; la idea fue profundizada posteriormente por Edmund Halley. El anemómetro, que mide la velocidad del viento, fue construido en 1667 por Robert Hooke; mientras Horace de Saussure completa el elenco del desarrollo de los más importantes instrumentos meteorológicos en 1780 con el higrómetro a cabello, que mide la humedad del aire.

Los pioneros de la ciencia moderna de la hidrología fueron Pierre Perrault, Edme Marriotte y Edmund Halley. Midiendo la precipitación, la escorrentía y el área de drenaje, Perrault demostró que la precipitación era suficiente para explicar el flujo del Sena. Marriotte combinó la velocidad y las medidas de corte transversal del río para obtener la

descarga, de nuevo en el Sena. Halley demostró que la evaporación del mar Mediterráneo era suficiente para explicar la efusión de los ríos que fluyen al mar.

2.5. Mecánica de Superfuerzas (1700-1800)

Durante el siglo XVII, los estudios experimentales en hidráulica tuvieron gran auge y como resultado se obtuvieron muchos principios hidráulicos, por ejemplo: el teorema y piezómetro de Bernoulli, la fórmula de Chézy y el principio de D'Alembert, los tubos de Pitot y Borda. Los desarrollos anteriores aceleraron el inicio de los trabajos hidrológicos de base cuantitativa.

2.5.1. Daniel Bernoulli

Bernoulli, Daniel (1700 - 1782). La historia comienza en 1598 cuando Benedetto Castelli refutó la forma de medir el flujo en los ríos, planteada por Giovanni Fontana, afirmando tomar en cuenta la sección y la velocidad. También aclaró que, en la medición en orificios, debía considerarse la carga y el tamaño de estos. En 1625, Castelli estableció la ecuación que lleva su nombre ($Q = AV$). Galileo Galilei (1638) sustentó la idea de que los cuerpos experimentan una aceleración uniforme al caer en el vacío. En 1641, Evangelista Torricelli demostró que la forma de un chorro al salir de un orificio es una hipérbola de 4º orden. Isaac Newton (1686) argumentó que el agua tiene una caída efectiva en el interior de un tanque y que el orificio tiene encima una carga real del doble de la altura del tanque. Daniel Bernoulli (1738) disipó el enigma de la doble columna y finalmente Johann Bernoulli, basado en los trabajos de su hijo Daniel, presentó una mejor explicación del escurrimiento en un orificio y logró una clara deducción de la ecuación de una línea de corriente (Pedroza, Ortiz & Martínez, 2007). Todo esto se puede leer en el libro de Daniel Bernoulli titulado *Hidrodinámica, comentarios acerca de las fuerzas y de los movimientos de los fluidos* (Figura 2.30), publicado en Estrasburgo en 1738. Con esta obra, la mecánica de fluidos nació como ciencia y de paso se estableció por primera vez, la palabra Hidrodinámica.



Figura 2.50. (a) Daniel Bernoulli. (b) Libro *Hidrodinámica* (C. Truesdell, 1984)

Además de la introducción de la primera teoría hidráulica del flujo de fluido, el libro de Daniel Bernoulli, *Hidrodinámica*, es el trabajo más notable en teoría que se haya escrito en el período pre-lagrangiano del siglo XVIII. Está basado en una comprensión física profunda de fenómenos mecánicos y presenta muchas ideas nuevas para el siguiente progreso científico (Mikhailov, 2005). El nombre de Daniel Bernoulli se encuentra estrechamente vinculado a la palabra «hidrodinámica», pues fue quien comenzó a usarla para referirse a varios temas de la hidrostática y la hidráulica. Según D'Alembert, la hidrodinámica no difiere de la hidráulica; sin embargo, Bernoulli fue el primero en plantear las leyes del movimiento de los fluidos basado en principios lógicos y coherentes, lo cual no había hecho nunca antes ningún estudioso de la hidráulica.

La forma como aparece hoy en la literatura especializada la llamada ecuación de Bernoulli no es la que originalmente se usa en su tratado *Hydrodynamica*, publicado en 1738 (Bernoulli, 1738). Nunca planteó que la suma de las tres formas de energía fuera constante. La ecuación atribuida a Daniel Bernoulli, en los términos tal cual se la conoce actualmente, fue en realidad concluida por Leonhard Euler en sus trabajos sobre el tema en 1755, logrando una aplicación precisa de las leyes de Newton al movimiento de los fluidos. La fundación de la

Hidrodinámica tuvo dos figuras cimeras: Euler y Bernoulli, sin embargo, Alexis Claude Clairaut y Jean Le Rond D'Alembert fueron también pilares en el desarrollo de esta ciencia, debido a sus sobresalientes aportes (Riaño, 2014).

En el libro *Tratado epistemológico del Principio de Bernoulli para estudiantes de ingeniería* (Sánchez et al., 2013), se señala que el Principio de Bernoulli fue descubierto por Daniel Bernoulli, científico y médico suizo nacido en Holanda. Su utilización en la vida cotidiana, tanto como en diversas aplicaciones industriales y médicas, lo ha hecho indispensable dentro de la formación académica de los estudiantes del Nivel Medio Superior y Nivel Superior. El Principio de Bernoulli trata en su enunciado del equilibrio y la conservación de la energía en la dinámica clásica de los fluidos. Las tres cantidades de energía mecánica que aparecen en la formulación del principio son las siguientes: energía de potencial gravitacional, energía cinética y energía de flujo.

La historia de la familia Bernoulli comienza en 1622 cuando Jacob, el viejo hugonote, se trasladó a Basilea en Suiza, huyendo de la persecución que mantenían los católicos de Bélgica (el país donde vivía Jacob) sobre los hugonotes. Casi en todas partes se difundía la alta tolerancia religiosa que se respiraba en Basilea; de hecho, el propio padre de los hugonotes, Juan Calvino, había emigrado ahí desde su Francia natal. Ya en Basilea, Jacob Bernoulli se casó tres veces y tuvo un solo hijo, al que nombró Nikolaus, quien engendraría la dinastía de los Bernoulli tan dotada de talento. Nikolaus se casó y llegó a tener doce hijos, de los cuales solo sobrevivieron cuatro, quienes llegarían a la edad adulta. Dos de estos supervivientes se convirtieron en matemáticos muy notables. Jacob en 1654 y Johann, nacido en 1667; aunque su padre, en un principio no percibiera el talento de este último. Desde un principio, las habilidades de Jacob le indicaban a su padre que él sería teólogo; en tanto que las habilidades de Johann, trece años más joven que Jacob, parecían encaminarlo por el oficio de comerciante. Jacob fingió obedecer las aspiraciones de su padre y se fue a la universidad para sacar un título en Filosofía y una licenciatura en Teología. Sin embargo, las verdaderas aspiraciones de Jacob, como más tarde se hicieron evidentes, eran la física y las matemáticas (Sánchez et al., 2013). Estudiaba las estrellas en contra de la voluntad de su padre, según él mismo escribió en su diario personal. Johann, por su parte, se alineó a las expectativas del padre y, en un principio, fue aprendiz en el próspero negocio familiar de especias y

medicina. No obstante, se desempeñó tan mal que el padre tuvo que reconsiderar cuál era el verdadero futuro de su hijo. Nikolaus, creyendo en la voluntad divina, pensó que el deseo de Dios era que su hijo se convirtiera en médico. Obedeciendo de nuevo, Johann ingresó en la Universidad de Basilea y obtuvo un título de médico. Mas, la verdadera pasión de Johann, al igual que su hermano Jacob, era las matemáticas; por tanto, se reunió en secreto con su hermano para aprender esta ciencia. Su conversión clandestina se produjo cuando el matemático alemán Gottfried Wilhelm Leibnitz publicó en 1684, un escrito muy notable donde se anunciaba su descubrimiento del cálculo. Los hermanos Bernoulli trataron de desentrañar los misterios del escrito sin mucho éxito, y únicamente después de varios intentos le escribieron al autor pidiendo ayuda, sin recibir respuesta alguna. Así fue como empezaron los hermanos Bernoulli con sus curiosidades en el mundo mágico de las matemáticas del cálculo. Hasta que cierto día, Jacob pudo desentrañar los misterios del escrito: Todo se basaba en una cantidad muy pequeña llamada infinitesimal. Después de algún tiempo, recibieron respuesta del autor de aquel escrito, y desde entonces tendrían una correspondencia estrecha y personal con él. Johann se convirtió de este modo en defensor de las ideas de Leibnitz (Sánchez et al., 2013).

Johann le mostró a Daniel lo que después se convertiría en su hallazgo más conocido, cuyo tema trataba sobre la energía mecánica, aunque en aquel tiempo no se la conocía así. En lugar de ello e imitando a Leibnitz, Johann llamaba a esa cualidad "vis viva" (fuerza viva, en latín), pues parecía que la poseían todos los cuerpos animados por el movimiento. Leibnitz había notado que la "vis viva" dependía únicamente de dos parámetros del objeto, su masa y su velocidad; por lo que expresó la siguiente Ecuación 1:

$$VIS . VIVAS = mv^2$$

Ecuación 1 Ley "vis viva", fuerza viva

Describió el experimento de arrojar una pelota hacia arriba con cierta velocidad inicial. Conforme la pelota subía se agotaba su "vis viva", hasta alcanzar una altura máxima donde se detenía, como si hubiese gastado su combustible. A partir de entonces, la pelota iniciaba su descenso hacia abajo ganando cada vez más velocidad y aumentando su fuerza viva, hasta el punto exacto en que fue lanzada, donde recobraba toda su "vis viva". De manera que cuando la pelota regresaba a su punto inicial de

partida, las cosas se restauraban a su estado inicial. Si analizamos ahora el movimiento con mayor cuidado se puede observar que a medida que la pelota va ganando altura, su "vis viva" decrece en su trayecto de ascenso. Efecto contrario al de su trayecto de descenso, donde su altura disminuye y aumenta su "vis viva". Esto significaba que la altura y su "vis viva" se compensan mutuamente durante todo el movimiento, cumpliéndose la siguiente Ecuación 2:

$$ALTURA + VIS \cdot VIVAS = \\ CONSTANTE$$

Ecuación 2 Ley "vis viva", fuerza viva y altura

Esta era entonces la ley de la conservación de la "vis viva" en la que Leibnitz, Johann y otros creían firmemente. A finales del siglo siguiente, esta ley se denominaría ley de la conservación de la energía (Truesdell, 1975).

Bernoulli pudo constatar la validez de la ley de continuidad de Leonardo da Vinci, planteada dos siglos antes, y verificó que en un lugar más estrecho de la tubería el fluido aumentaba su velocidad; mientras que en tramos más anchos de la misma tubería, el fluido viajaba a una velocidad más lenta. Sin embargo, lo que después percibió no lo habían visto antes, pues se trataba de una nueva característica que Bernoulli descubrió. El líquido que se movía en una sección de la tubería ancha, lo hacía con mucha lentitud y tenía mayor presión. En tanto, el líquido que se movía rápidamente en una sección de la tubería estrecha, tenía menor presión que en el primer caso. Parecía existir una compensación entre la velocidad del fluido y la presión: a mayor presión, el fluido se movía más lentamente; a menor presión, el fluido se movía más rápidamente. En seguida Bernoulli recordó el principio de conservación de la "vis viva" de Leibnitz, en otras palabras, vino a su memoria la Ecuación 1 sobre la definición de la "vis viva". Resultaba increíble que el problema de la dinámica de los fluidos se redujera a un problema supuestamente válido solo para cuerpos sólidos.

Bernoulli estuvo muy contento cuando los cálculos lo llevaron a la versión para fluidos de la "vis viva", de Leibnitz. Solo tuvo que hacer una pequeña sustitución. En lugar de la masa "m" del cuerpo sólido, aparecía la densidad del fluido representada por la letra griega "rho" (Ecuación 3).

$$VIS \cdot VIVAS = \rho v^2$$

Ecuación 3 Ley "vis viva", uso de la densidad

De acuerdo con esto, la ley de conservación de la "vis viva" para fluidos, según Bernoulli tiene la forma de la siguiente Ecuación 4:

$$VIS \cdot VIVAS + PRESIÓN = \rho v^2$$

Ecuación 4 Ley "vis viva", inclusión de la presión

Utilizando el símbolo "P" para la presión, la versión de Bernoulli de la ley de conservación de la "vis viva" tenía la forma siguiente (Ecuación 5):

$$\rho v^2 + P = CONSTANTE$$

Ecuación 5 Ley "vis viva", forma de la ecuación de Bernoulli

El razonamiento de Bernoulli se aplicaba bastante bien al caso de la presión sanguínea, en el cuerpo humano. Cuando el corazón bombea la sangre, el diámetro de la arteria crece, disminuyendo la velocidad de la sangre (de acuerdo a la ley de continuidad de Leonardo da Vinci), de tal modo que su "vis viva" desciende; por otro lado, la compensación viene por un aumento en la presión de la sangre. Caso inverso cuando el corazón se relaja, pues la arteria momentáneamente se contrae y la sangre se apresura a fluir aumentando su "vis viva", con una consiguiente disminución en la presión arterial. Un siglo después del descubrimiento de Bernoulli, el médico alemán Gustave Gaspard Coriolis añadiría un factor adicional de un medio, a la expresión de la vis viva de Bernoulli, lo hizo al resolver un problema que tenía que ver con la rotación de la Tierra, puesto que convenía a sus propios cálculos. La versión de Coriolis tuvo mucho éxito y se difundió rápidamente (Ecuación 6).

$$\rho (1/2)v^2 + P = CONSTANTE$$

Ecuación 6 Ley "vis viva", forma de la ecuación de Bernoulli, versión de Coriolis

Bernoulli, un joven de treinta años de edad, había dado a su época un conocimiento invaluable sobre la dinámica de los fluidos. Antes de 1730 dicha regla, absolutamente sencilla y cierta, era aún desconocida por el mundo (Truesdell, 1984).

Podemos corroborar que los aportes científicos se comportan como eslabones de una gran cadena en donde uno no puede existir sin el anterior. Sin los aportes de Newton y de tantos otros que lo precedieron, no hubiera sido posible establecer los principios generales del movimiento de los fluidos. Este planteamiento teórico es válido para todas las ramas del conocimiento humano y se encuentra vigente en la actualidad, además se trata de un pilar importante que permite continuar generando conocimiento a futuro.

2.5.2. Antoine Chézy

Chézy, Antoine (1718 - 1798), ingeniero hidráulico francés y autor de una fórmula básica para calcular la velocidad de una corriente de fluido (Figura 2.31).

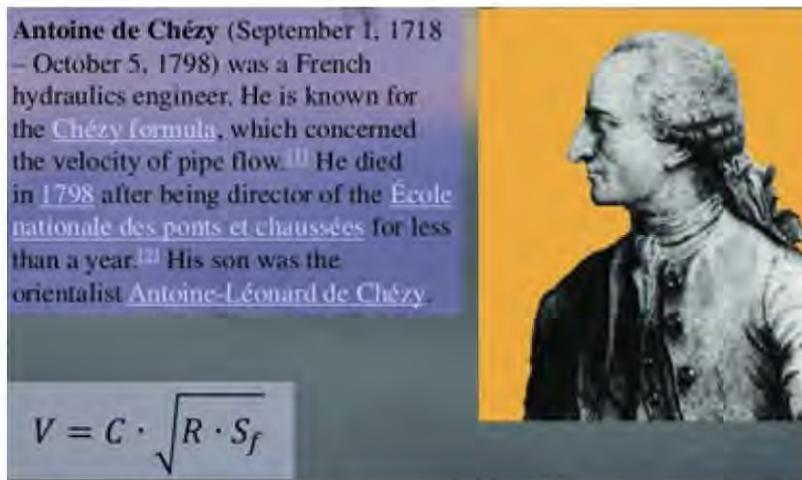


Figura 2.31. Antoine Chézy (Ponce, 2015)

En 1749, mientras trabajaba en Amsterdam, Cornelius Velsen declaró: “La velocidad debe ser proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente”. En 1757, en Hannover, Alemania, Albert Brahms escribió: “La acción desaceleradora de la fricción de fondo en un flujo uniforme no solo es igual a la acción aceleradora de la gravedad sino también es proporcional

al cuadrado de la velocidad". A Chézy se le dio la tarea de determinar la sección transversal y la descarga para un canal en el río Yvette, cerca de París, pero a una mayor elevación. Desde 1769, fue recopilando datos experimentales del canal de Courpalet y del río Sena. Sus estudios y conclusiones figuran en un informe al Sr. Perronet, con fecha del 21 de octubre de 1775. El documento original, escrito en francés, se titula "Tesis sobre la velocidad del flujo en un canal", y está firmado por el Sr. Chézy, Inspector General de la Escuela de Puentes y Caminos. El documento se encuentra en el expediente N° 847, manuscrito N° 1915, de la colección que obra en la biblioteca de la escuela (Ponce, 2015).

En 1776, Chézy escribió otro artículo, titulado "La fórmula para encontrar la velocidad uniforme que el agua tendrá en un canal de pendiente conocida". Este documento, que reside en el mismo archivo —Exp. N° 847, Ms. N° 1915—, contiene la famosa fórmula de Chézy (Ecuación 7).

$$v = 272 ah/P^{1/2}$$

Ecuación 7 Fórmula de Chézy

En la que "h" es la pendiente, "a" es el área, y "P" es el perímetro mojado. El coeficiente 272 es aplicable al canal de Courpalet en un sistema de unidades antiguo. En el sistema métrico, el valor equivalente es como sigue (Ecuación 8):

$$v = 31 ah/P^{1/2}$$

Ecuación 8 Fórmula de Chézy
Sistema Métrico

Clemens tradujo los dos documentos de Chézy al inglés. Riche de Prony, uno de los ex-alumnos de Chézy, fue el primero en utilizar su fórmula. Más tarde, en 1801, en Alemania, Eytelwein utilizó las ideas de Chézy y De Prony para popularizar el uso de la fórmula (Ponce, 2015).

La fórmula de Chézy, tal como la conocemos hoy, incluye un coeficiente dimensional. Debe destacarse que la formulación original considera una simple comparación entre dos corrientes de agua trabajando en régimen uniforme, que tienen similares características. Todo indica que la expresión $V = C\sqrt{RS}$ se debe a una nota posterior en la cual él redujo el término de la izquierda de su primera ecuación (VVP/AH) a una constante

para simplificar los cálculos. En ningún momento planteó, como algunos han supuesto, que era una constante para todas las corrientes. Incluso él mismo encontró variaciones de una corriente a otra (Riaño, 2016).

2.5.3. Jean le Rond d'Alembert

Jean le Rond d'Alembert (1717 -1783). La paradoja de D'Alembert es una contradicción a la que llegó su autor luego de estudiar, matemáticamente, el fenómeno de la resistencia producida sobre un cuerpo cuando una corriente de fluido (líquido o gas) circula sobre él. Aplicó la teoría de flujo potencial para modelar el fenómeno, y concluyó que la fuerza resultante en el cuerpo sobre el cual fluye el aire es cero, lo que se contradice con la observación (Figura 2.32).



Figura 2.32. Jean le Rond d'Alembert (González, 2014)

Trató de encontrar un principio para calcular el movimiento de múltiples cuerpos que actúan entre sí. A esto se le ha llamado principio de D'Alembert, así también teorema de la dinámica, porque no es una aplicación simple de un principio o axioma, sino un teorema deducible a partir de las leyes generales de movimiento. Esto lo sabía muy bien D'Alembert, por eso al inicio de su obra *Tratado de Dinámica*, se dedicó a determinar y reducir al máximo el número de ecuaciones que gobiernan el movimiento, los cuales quedaron en tres: inercia, movimiento compuesto

y la del equilibrio (Gonçal, 2014). Una vez establecidos en forma clara estos principios, más adelante los aplicó a los fluidos en su publicación *Tratado del equilibrio y movimiento de los fluidos* (1744), así como al movimiento del aire en sus *Reflexiones sobre la causa general de los vientos* (1746). En cuanto a los fluidos, intentó aplicar un modelo físico-matemático de los cuerpos rígidos desarrollado en el tratado de dinámica.

2.5.4. Henri Pitot

Henri Pitot (1695 - 1771). El tubo de Pitot se utiliza para calcular la presión total, también denominada presión de estancamiento, presión remanente o presión de remanso (suma de la presión estática y de la presión dinámica) (Figura 2.33). Fue un invento del ingeniero francés Henri Pitot en 1732, al que Henry Darcy modificó en 1858; se utiliza mucho para medir la velocidad del viento en aparatos aéreos y para cuantificar las velocidades de aire y gases en aplicaciones industriales. Mide la velocidad en un punto dado de la corriente de flujo, no la media de la velocidad del viento (Brown, 2003).

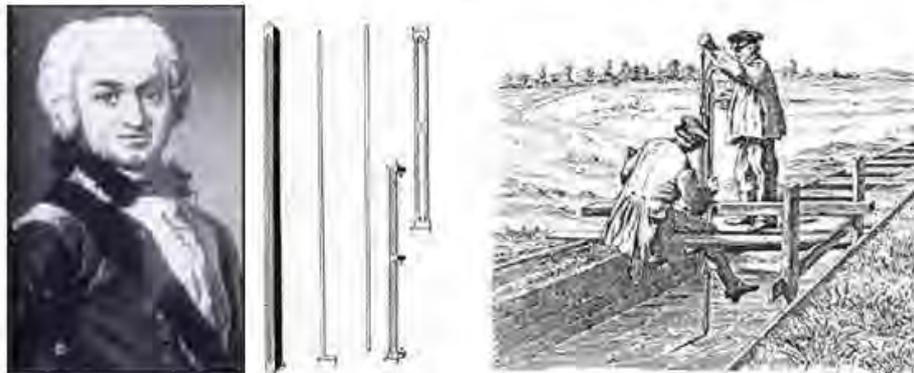


Figura 2.33. (a) Henri Pitot. (b) Tubos de Pitot. (c) Mediciones en campo (G. Brown, 2003)

El dispositivo de Pitot fue calificado como innovador en el momento, siendo descrito en detalle ampliamente (Chanson, 2013). Sin embargo, tenía cuatro deficiencias que limitaron su aplicación. Primero, Pitot no proporcionó el análisis teórico para el dispositivo. Segundo, el instrumento fue lento e incómodo de usar. Tercero, la combinación del marco de gran tamaño y la gran estática. En cuarto lugar, todos los diseños tuvieron problemas con oscilaciones en los niveles de agua. No hubo una comprensión clara de cómo la forma de la entrada del tubo Pitot y el rendimiento fueron afectados (Hutton, 1958).

2.6. Periodo de Modernización (1800 a 1900)

El siglo XIX fue una gran era de hidrología experimental que tuvo su inicio en el período precedente y que marcó con mayor solvencia el comienzo de la ciencia de la hidrología. Sin embargo, la mayoría de las contribuciones se dieron en la Geohidrología y medición de las aguas superficiales (Hidrometría). Por ejemplo: la ecuación de Hagen–Poiseuille del flujo capilar (1840), la Ley de Darcy (1856), la fórmula del pozo de Dupuit-Thiem (1863) y el principio de Ghyben-Herzberg (1889). En el campo de la hidrometría, en relación al aforo de aguas superficiales, se tuvo un gran avance, incluyendo el desarrollo de varias fórmulas del flujo e instrumentos de medida y el comienzo del aforo sistemático de corrientes. Entre las contribuciones principales están la fórmula de descarga de los vertedores de Francis (1855); la determinación del coeficiente de Chézy, propuesta por Ganguillet y Kutter (1869) y por Manning (1889); y, en el campo de la evaporación, la Ley de Dalton (1802); por último, en el campo de las precipitaciones, Miller (1849) correlacionó la lluvia con la altitud.

2.6.1. Jean Poiseuille

Jean Leonard Marie Poiseuille (1797-1869). La ley de Poiseuille o ecuación de Poiseuille, también conocida como Hagen–Poiseuille es una ley física que proporciona la caída de presión dentro de un fluido incompresible y newtoniano, en flujo laminar que discurre a través de un tubo cilíndrico largo de sección transversal constante (Figura 2.34).

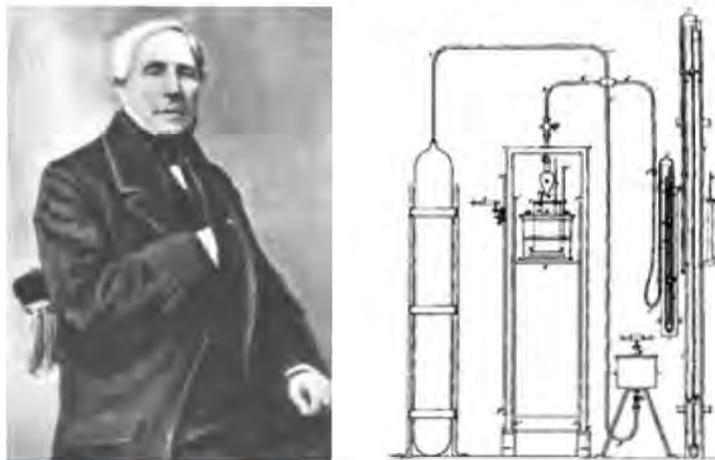


Figura 2.34. (a) Jean Poiseuille. (b) Elevación frontal aparato de Poiseuille (1846) (Sutera & Skalak, 1993)

En la notación de dinámica de fluidos estándar (Ecuación 9):

$$\Delta P = \frac{8\mu LQ}{\pi R^4}$$

Ecuación 9 Fórmula de Poiseuille

Donde: ΔP es la diferencia de presión entre los dos extremos, L es la longitud de la tubería, μ es la viscosidad dinámica, Q es la tasa de flujo volumétrico, R es el radio de la tubería (Sutera & Skalak, 1993).

2.6.2. Henry Darcy

Con la ayuda de Henry Bazin, a inicios de 1856, Henry Darcy (1803 - 1872) publicó cuatro obras que muestran varias formas de un diseño mejorado de tubo de Pitot (Figura 2.35). Aunque Henri Pitot había inventado el dispositivo en 1732, sus debilidades teóricas y de diseño lo habían relegado a poco más que un juguete científico. Los instrumentos mejorados de Darcy proporcionaron mediciones precisas y fáciles de la velocidad de punta por primera vez, lo que permitió avances en canales abiertos y sistemas hidráulicos de flujo de tuberías.

Su diseño final para la punta del instrumento se refleja hoy en todos nuestros instrumentos modernos (Figura 2.36) (Brown, 2003). Se completó una reproducción del diseño publicado de 1858 de Darcy y se demostró que funciona según lo informado. La contribución de Darcy al desarrollo del dispositivo igualaba o incluso superaba el trabajo inicial de Pitot; por tanto, era apropiado referirse al instrumento moderno como el "tubo Pitot-Darcy".

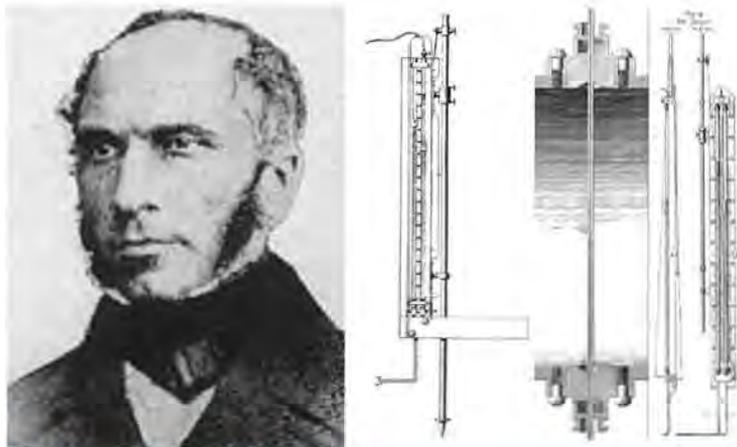


Figura 2.35. (a) Henry Darcy, (b) Tubo de Pitot mejorado: 1968, 1957, 1956 (Brown, 2003)

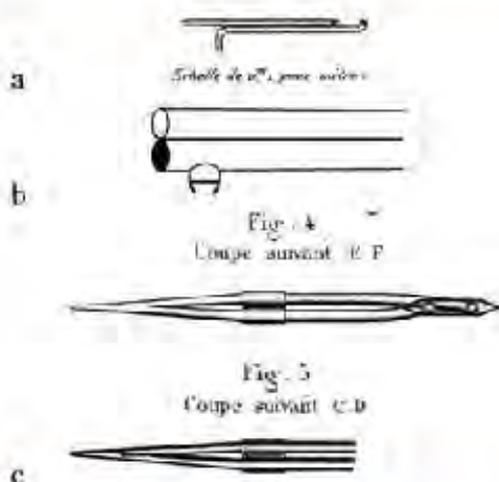


Figura 2.58. Boquillas diseñadas por Henry Darcy (a) 1856, (b) 1858, (c) 1856 (G. Brown, 2003)

Otro de sus importantes aportes se da en 1856, cuando publicó el tratado sobre la red de distribución de Dijon titulado *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* (Figura 2.37). En el cual aparece, como un apéndice de su informe, la fórmula que desde entonces lleva su nombre (Ley de Darcy). De ella, se deduce una unidad de medida: un "darcy", correspondiente a la permeabilidad de un cuerpo asimilable a un medio continuo e isótropo, a través del cual un fluido homogéneo con viscosidad igual a la del agua a 20°C se desplaza a la velocidad de 1 cm/s bajo un gradiente de presión de 1 atm/cm (Darcy, 1856).



Figura 2.37. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon* (Darcy, 1856)

La Ley de Darcy es la ecuación fundamental que describe el flujo de fluidos a través de medios porosos, incluida el agua subterránea. Constituye la base cuantitativa de muchas disciplinas científicas y de ingeniería, como la hidrología, la hidrogeología, la ciencia del suelo, la ingeniería civil, la ingeniería petrolera y la ingeniería química. El año 2006 marcó el 150° aniversario de la publicación del texto más famoso de Henry Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, 1856. Se encontró la Nota D, un apéndice que contenía los famosos experimentos de la columna de arena (Figura 2.38). El descubrimiento de la Ley de Darcy marcó el nacimiento de la hidrogeología cuantitativa (Simmons, 2008).

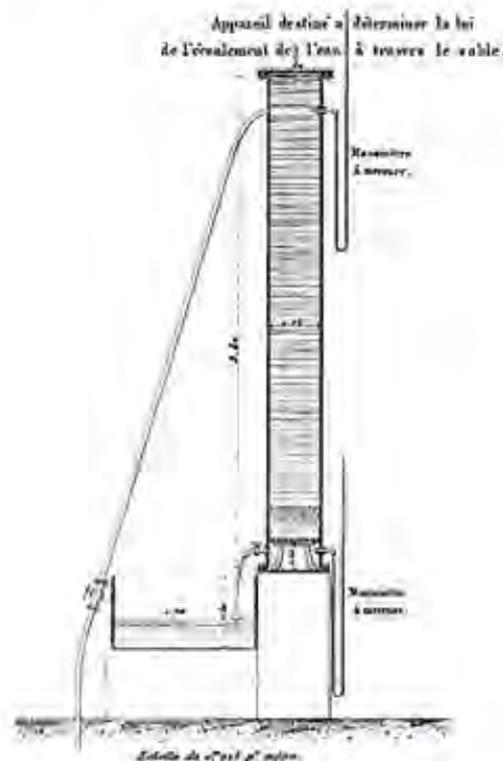


Figura 2.38. Columna de arena original de Henry Darcy (Darcy, 1856)

En 1857 publica un nuevo tratado, referido a sus Investigaciones experimentales del movimiento del agua en tuberías que permite el cálculo de la pérdida de carga, producto de la fricción dentro de una tubería. Esto se conoce como ecuación de Darcy-Weisbach y es una ecuación ampliamente usada en hidráulica (Simmons, 2008). Asimismo, realizó experimentos de campo en canales abiertos para determinar la relación entre velocidad, área

y pendiente. Como ingeniero civil, se encargó del proyecto del canal de Borgoña, proyectando y construyendo el sistema de suministro de agua potable a Dijon y una parte del ferrocarril París – Lyon.

En ese momento, la ecuación de Prony (Ecuación 10) era la ecuación de resistencia al flujo de tubería ampliamente aceptada que se utilizaba para calcular las pérdidas de carga en tuberías (y canales abiertos que usaban diferentes coeficientes empíricos); no obstante, era propensa a error por la tubería empírica y recomendada, pues los coeficientes de fricción no tuvieron en cuenta la rugosidad de la tubería.

$$H_L = \frac{L}{D} (aV + bV^2)$$

Ecuación 10 Ecuación de Prony

Donde H_L es la pérdida de carga debido a la fricción calculada, a partir de la relación entre la longitud y el diámetro interno de la tubería L/D , la velocidad del flujo, y , a y b son dos coeficientes de fricción empírica que explican la fricción. Los valores del coeficiente de fricción de Prony fueron debatidos, pero se creía que no eran una función de la rugosidad de la tubería (Brown, 2002).

Los nuevos resultados de Darcy mostraron que el factor de fricción de la tubería (por ende, la pérdida de carga) era una función de la rugosidad de la tubería y de su diámetro. De hecho, su nueva formulación proporcionó una mejor estimación de las pérdidas. Darcy propuso una ecuación similar a la de Prony, con coeficientes de fricción que eran una función del diámetro de tubo D , y que se reducía a la versión ahora conocida como la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 11) a altas velocidades (Brown, 2002).

$$H_L = \frac{L}{D} \left(\alpha + \frac{\beta}{D^2} \right) V + \left(\alpha' + \frac{\beta'}{D} \right) V^2$$

Ecuación 11 Ecuación de Pérdidas por Fricción Tuberías de Darcy

Donde alfa, beta, alfa', beta' son coeficientes de fricción. Señaló que el primer término podría eliminarse para tuberías viejas y a velocidades más altas para obtener una ecuación que se parece a la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 12), la cual se usa comúnmente en la actualidad.

$$H_L = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Ecuación 12 Ecuación de Pérdidas por Fricción Tuberías de Darcy-Weisbach

Donde f suele llamarse factor de fricción de Darcy y es una función implícita de la rugosidad relativa y el número de Reynolds (Reynolds 1883), y g es la aceleración debido a la gravedad.

Usando los resultados de los experimentos realizados por Darcy en la columna de arena, este declaró su ley (exactamente como está escrito en la Ecuación 13) por primera vez, notando que la presión en la parte superior de la capa era $P + h$ (donde P = presión atmosférica y h es la altura del agua en la capa de arena), y en la parte inferior de la capa fue $P \pm h_o$ para ceder, en términos generales:

$$q = k \frac{s}{e} (h + e \pm h_o)$$

Ecuación 13 Ley de Darcy

Donde q es el volumen de agua descargada (por unidad de tiempo), k es un coeficiente que depende de la permeabilidad de la capa, e es el espesor de la capa de arena y s es su área de superficie. La ecuación 12 se puede generalizar fácilmente en términos de cargas de presión generales y cargas de elevación en la entrada y salida en consecuencia para ceder, la versión más familiar que se usa rutinariamente en la actualidad. Además, la unidad de permeabilidad de Darcy (D) ampliamente utilizada en geología e ingeniería petrolera reconoce que este fue el primero en notar que el flujo dependía de un coeficiente de permeabilidad, una consecuencia directa de sus experimentos y el descubrimiento de su ley. Una serie de puntos interesantes se desprenden de los experimentos de columna que ayudan a contextualizar la Ley de Darcy y el proceso de su descubrimiento (Brown, 2002): (1) Darcy no tropezó con su ley, la sospechaba. (2) Darcy entendió que su descubrimiento era nuevo e importante. (3) Usó modelos de tubos capilares de medios porosos y el volumen elemental representativo. (4) El aumento de las leyes de gradiente lineal. Curiosamente, desde principios hasta mediados del siglo XIX vio el nacimiento de todo el conjunto de leyes de gradientes lineales.

2.6.3. Jules Dupuit

Arsène Jules Étienne Dupuit (1804-1866) hizo contribuciones en varias áreas de la ingeniería. Su trabajo más significativo se da en recursos hídricos, específicamente análisis económico, hidrología de inundaciones, suministro de agua, hidráulica y aguas subterráneas. Se

sabe que Dupuit (Figura 2.39) desempeñó un papel importante en el avance de los análisis de ingeniería a través de su capacidad para aplicar las matemáticas en sistemas complejos. Él definió los procesos relacionados con los recursos hídricos y demostró cómo se podrían cuantificar, estudiar y diseñar (Brown, 2004).



Figura 2.39. Jules Dupuit (G. Brown, 2004)

En 1846, Dupuit fue testigo de grandes inundaciones en el río Loira. Esto llevó su atención, al menos en parte, hacia la hidrología de inundación. En aquel momento había poca apreciación de los procesos básicos y los conceptos erróneos eran comunes. Dupuit aplica conceptos de continuidad para refutar errores y apoyar sus recomendaciones. En 1858 publicó un panfleto abordando los problemas que todavía enfrentamos hoy, donde señaló que las represas disminuyen los picos de las inundaciones y aumentan el período de inundación. Sin embargo, las estructuras de retención inundan gran cantidad de tierra con considerables consecuencias para los habitantes. Indicó también que las pequeñas estructuras de tierras altas tienen una influencia limitada sobre las inundaciones en los grandes ríos, y pueden ser ineficientes durante las largas tormentas; mientras que los sitios para los grandes embalses son difíciles de localizar. Por otro lado, observó que los diques de los ríos son efectivos, pero propensos a daños. Afirmó, además, que el daño creado

por las roturas de los diques era una función de su altura, por lo cual instó al gobierno a controlar su construcción. Finalmente, volviendo a sus intereses económicos, argumentó que quienes ganan deben pagar por el financiamiento de cualquier obra de control de inundaciones (Brown, 2004).

Dupuit repartió y recibió considerables críticas sobre los problemas de hidrología de inundación. Sin embargo, sus escritos anticiparon en gran medida todas las discusiones futuras en el campo y sus conclusiones han demostrado ser generalmente válidas.

En cuanto al suministro de agua, en 1854 publicó *Traité théorique et pratique de la conduite et de la distribution des eaux*. Este libro y una segunda edición ampliada, que se publicó en 1865, presentan una multitud de temas relacionados con el suministro de agua y contienen contribuciones de otros dos autores (Brown, 2004). La parte escrita por Dupuit abarca 15 capítulos cuyos títulos son: Cantidad y calidad de agua para distribuir; Distribución de agua a privados; Hidráulica de distribución de agua; Conductos hidráulicos simples; Conductos complejos de Diámetro Variable; Servicio de carretera; Conductos suministrados por diversos reservorios; Requisitos de resistencia de conductos; Distribución de superficie libre; Canales, Acueductos, y alcantarillas; Bombas, tanques de sobretensiones y emisiones de aire; Diseño de conductos; Ejecución y Mantenimiento; Documentos; y Tablas. Como se puede deducir, era un volumen enciclopédico destinado a permitir que el ingeniero practicante diseñe todas las características necesarias de un sistema de suministro de agua. Fue notable la cobertura de Dupuit en la hidráulica de redes de tuberías, considerada como original. Esos conceptos se aplicaron a las redes de suministro de agua y flujo de múltiples depósitos en un sistema de tuberías.

En contraste con su publicación de suministro de agua, en 1848 publicó un libro teórico en el campo de la hidráulica, al cual nombró *Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux courantes*, y que fue seguido en 1863 por una segunda edición ampliada. Hager (2004) señala que, en particular, el segundo volumen del libro cubría casi todos los temas de un libro teórico de canales abiertos moderno. Los capítulos se titulan: Flujo uniforme, Flujo gradualmente variado, Remanso Curvas, Flujo bruscamente variable, Flujo inestable, Influencias en los canales, Ríos con lechos móviles y Flujo de agua subterránea. Usando varias aproximaciones y series de integración de la ecuación de flujo

gradualmente variado, identificó correctamente el agua en perfiles de superficie para canales horizontales, leves y empinados. Sus resultados se aplicaron a problemas típicos, como el flujo dividido en las islas (Figura 2.40).

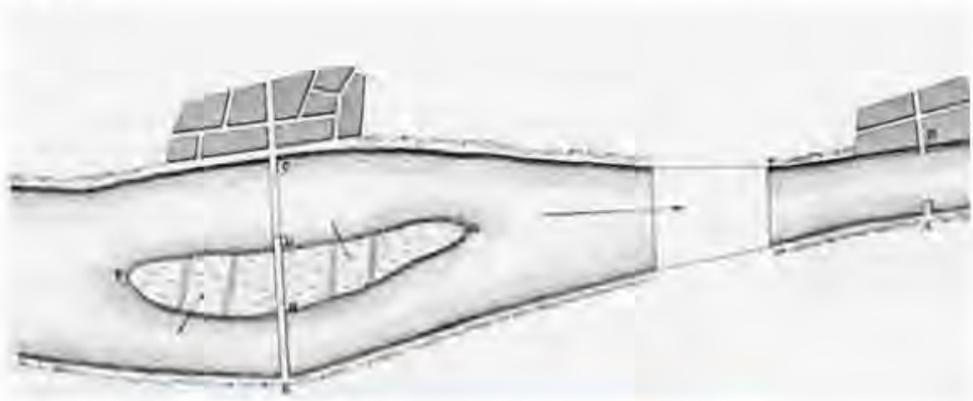


Figura 2.40. Flujo al contorno de una isla (Dupuit, 1863)

Dupuit fue también el primero en introducir la Ecuación 14, para el movimiento de las ondas de inundación (Rouse & Ince, 1958).

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial s}$$

Ecuación 14 Ley de Movimiento de ondas de inundación

Nuevamente, su trabajo fue una mejora significativa con respecto a los textos existentes. Sin embargo, pronto fue eclipsado por los resultados experimentales de Darcy & Bazin (1865) y la presentación teórica de Boussinesq (1877).

En relación con las aguas subterráneas, el único logro de Dupuit —el cual lleva comúnmente su nombre— se dio en el área de hidráulica de aguas subterráneas, en su volumen de 1863. Dupuit presenta soluciones para el flujo en medios porosos con diversas condiciones; aplicó la Ley de Darcy a una colección de geometrías incluyendo cónicas, filtros artificiales, sistemas estratificados y acuíferos naturales, así también acuíferos inclinados y pozos al lado de las corrientes. Sus soluciones proporcionan caudales, distribuciones de presión o elevaciones de la tabla de agua para condiciones de flujo constante. Cada una era original, sin embargo, la mayoría tiene aplicación limitada. La excepción es donde resolvió de

manera constante, el flujo a un pozo en coordenadas radiales, lo que él llamó un "pozo común". Su solución para el acuífero horizontal no confinado fue como se presenta en la Ecuación 15:

$$Q^* = \pi\mu \frac{H^2 - h_w^2}{\ln(L/R)} = 2\pi\mu \frac{H - h_w}{\ln(L/R)} \frac{H + h_w}{2}$$

Ecuación 15 Solución para el acuífero horizontal no confinado

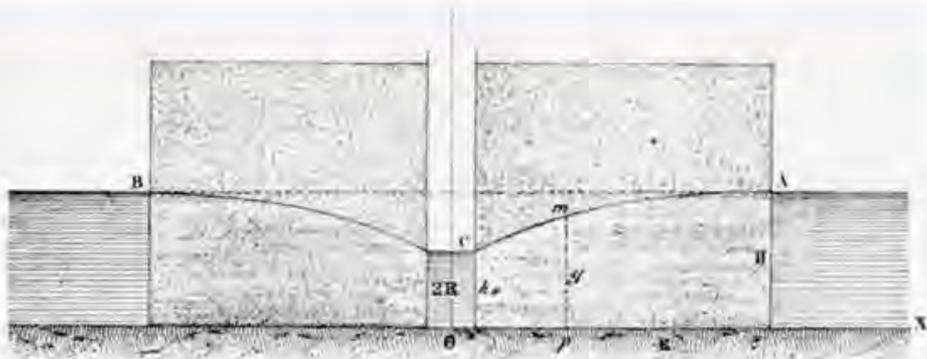


Figura 2.41. Solución Dupuit para flujo a un pozo (Dupuit, 1863)

2.6.4. Günther Thiem

En su libro *Hidrologische Methodem*, Günther Thiem sintetiza en 1906 la formulación de la hidráulica de pozos en régimen permanente y establece las bases de ensayos de bombeo para acuíferos confinados y régimen de equilibrio (García, 2015). Estos métodos, cuyas expresiones se presentan a continuación, relacionan los descensos en un punto que se sitúa a una distancia r de un pozo de bombeo, con el caudal Q en dicho pozo, la transmisividad T o la permeabilidad k y el radio de influencia del acuífero (Ecuación 16).

$$H_o - H = \frac{Q}{2\pi T} L \frac{R}{L}$$

Ecuación 16 Fórmula de Thiem para acuífero confinado

Se debe alertar que la hidráulica de pozos ha tomado dos rutas: La primera pretende determinar flujos de drenaje y alturas piezométricas del agua, frente a condiciones impuestas y unos determinados parámetros del acuífero; en tanto que la segunda hace frente a condiciones prefijadas observadas y medidas, y permite calcular los parámetros que faciliten el

funcionamiento del sistema según ha sido observado, a esto se conoce como problema inverso (García, 2015). Esta segunda ruta, sin duda, es el método más difundido y donde ha ido integrándose con mayor importancia el tema de los ensayos de bombeo. Dichos ensayos son de fácil aplicación y mayor garantía, se usan tradicionalmente para conocer las características hidrogeológicas de los acuíferos, así como el grado de perfección del acabado de las captaciones de aguas subterráneas que se ubican en ellos.

Los métodos de Dupuit y Thiem permiten calcular parámetros como transmisividad o permeabilidad, radio de influencia e incluso pérdidas de carga en el pozo, cuando la realidad física del sistema respeta las siguientes condiciones (García, 2015): Acuífero homogéneo, isotrópico e infinito; Flujo radial y régimen laminar; No existen recargas exteriores; Penetración total de la formación permeable; Caudal de bombeo constante sin infiltración; Pozo de diámetro cero; y Régimen permanente con niveles de equilibrio. Finalmente, el método de Thiem es aplicable además a acuíferos confinados; mientras que el de Dupuit, a acuíferos libres.

2.6.5. Ghyben-Herzberg

Las primeras formulaciones físicas de la intrusión de agua salada fueron hechas por W. Badon-Ghyben (1888, 1889) y A. Herzberg (1901), por lo que fueron llamadas relación Ghyben-Herzberg. Derivaron soluciones analíticas para aproximar el comportamiento de intrusión, basadas en una serie de suposiciones que no se cumplen en todos los casos de campo. Al considerar una esquematización convenientemente elegida del régimen de flujo en un acuífero costero no confinado de gran profundidad, se deriva una generalización de la fórmula de Ghyben-Herzberg, que explica la descarga de agua dulce hacia el mar (Figura 2.42) (Verruijt, 1968).

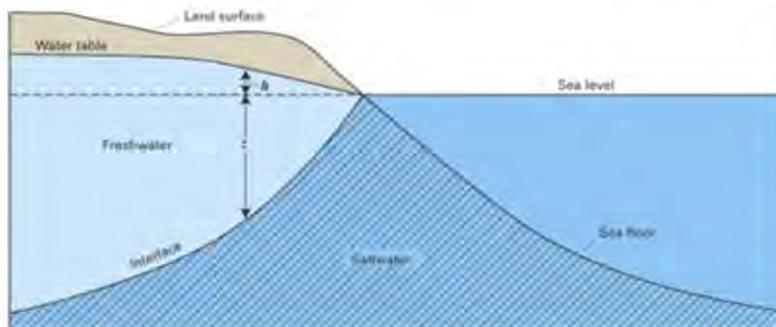


Figura 2.42. Relación Ghyben-Herzberg (Verruijt, 1968)

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h, \dots \dots z = 40 h$$

Ecuación 17 Fórmula de Ghyben - Herzberg

El espesor de la zona de agua dulce sobre el nivel del mar se representa como h y el nivel del mar debajo se representa como z. Los dos espesores, h y z, están relacionados por ρ_f y ρ_s : densidades del agua dulce y del agua salada, respectivamente. El agua dulce tiene una densidad de aproximadamente 1000 gramos por centímetro cúbico (g/cm³) a 20° C, mientras que la del agua de mar es de aproximadamente 1 025 g/cm³. La ecuación se puede simplificar a $z=40h$. La relación Ghyben-Herzberg establece que por cada pie de agua dulce en un acuífero no confinado sobre el nivel del mar, habrá cuarenta pies de agua dulce en el acuífero por debajo del nivel del mar (Verruijt, 1968).

2.6.6. Ganguillet y Kutter

Tomando como base sus experiencias en cursos de agua alpinos y el estudio realizado por Darcy y Bazin, así como el de Humphreys y Abbot en el río Mississipi, los ingenieros suizos E. Ganguillet y W.R. Kutter proporcionaron en el año 1869 una expresión para el coeficiente de Chézy, en función de la rugosidad de las paredes de la conducción libre, de la pendiente motriz o hidráulica y del radio hidráulico medio (Bernis, 2003). Lo que se grafica en la Ecuación 18.

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

Ecuación 18 Coeficiente C de Chézy, planteado por Ganguillet y Kutter

Donde n es un coeficiente que depende de la rugosidad de las paredes y resulta idéntico al coeficiente de Manning.

Para la aplicación de esta fórmula se han elaborado diversas tablas y ábacos. La expresión anterior fue simplificada por el propio Kutter, proponiendo que para pendientes superiores a 0,0005 se usara el coeficiente de Chézy, Ecuación 19.

$$C = \frac{100 \sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$$

Ecuación 19 Coeficiente C de Chézy, planteado por Kutter

Ahora m representa un nuevo coeficiente de rugosidad cuyos valores se encuentran tabulados en la bibliografía clásica, siendo que C ya no depende de la pendiente motriz.

2.6.7. A. Humphreys y L. Abbot

Realizaron observaciones en el río Mississippi (1851-1858), la enunciación de Gauckler de la fórmula del monomio potencial dos tercios, basada en los datos de Bazin, fue casi totalmente descuidada en los años posteriores por escritores en hidráulica, quienes dedicaron su ingenio y trabajo a la búsqueda de una nueva fórmula universal que les permitiera ajustar los datos de Bazin y los datos casi contemporáneos de las observaciones realizadas sobre el río Mississippi (Yen, 1992). Las últimas medidas se llevaron a cabo bajo un acta del Congreso "Directing the Topographical and Hydrographical survey of the most practicable plan for securing it from inundation, and the best mode of deepening the channels at the mouths of the river".

Un encabezado lateral en el Informe (Humphreys & Abbot, 1867) dice: "Los datos de este registro exigen una fórmula exacta que exprese algebraicamente las relaciones existentes entre las dimensiones de la sección transversal, la pendiente de la superficie del agua y la velocidad media de los ríos". (p.7).

Ninguna de las fórmulas existentes se encontró aceptable sobre la base de una serie de medidas especiales basadas en largas longitudes de un canal recto y sensiblemente uniforme (Figura 2.43). La comparación de las fórmulas del Informe Misisipi se sustentó en 10 mediciones en el río Mississippi, 6 en pantanos cerca de la boca superior y 14 más en ríos y canales de varios países. De interés primordial para nosotros son las diez mediciones en el Mississippi, aceptadas y utilizadas por Banguillet y Kutter en 1869; pero rechazadas por Manning en 1889 (Humphreys & Abbot, 1867). Estas consistieron en cuatro mediciones en Carrollton en 1851, una medición en Columbus en mayo de 1858 y cinco mediciones en Vicksburg en 1858. En estas diez pruebas, el área variaba entre 78,000 y 195,000 pies cuadrados y la pendiente entre 3.4×10^{-6} y 68.0×10^{-6} . Las velocidades, que se midieron mediante flotadores dobles en un tramo recto de 200 pies, variaban de 3.52 a 6.95 pies por segundo (Yen, 1992).



Figura 2.45. Reporte sobre observaciones en el río Mississippi

Humphreys & Abbot (1867) procesaron la Ecuación 20:

$$V = \left[\left(\frac{2.48A}{P+W} \right)^{1/4} S^{2/3} - 0.0368 \right]^2 \quad \text{Ecuación 20 F\u00f3rmula de Humphreys \& Abbot}$$

$$V = \beta \cdot 5.86 R^{1/2} S^{2/3}$$

Donde V es la velocidad de flujo en pies/s, A es el \u00e1rea en pies cuadrados, P es per\u00edmetro mojado en pies, W es el espejo de agua en pies y S es la pendiente longitudinal. Para velocidades peque\u00f1as, se puede utilizar la expresi\u00f3n reducida con Beta, donde Beta toma valores sealados en la bibliograf\u00eda de referencia (Yen, 1992).

2.6.8. Robert Manning

Robert Manning (1816-1897) fue un ingeniero irland\u00e9s, conocido por la creaci\u00f3n de la f\u00f3rmula de Manning, muy difundida en el mundo y de aplicaci\u00f3n universal en la hidr\u00e1ulica de canales a l\u00e1mina libre (Figura 2.44).



Figura 2.44. Robert Manning (Ponce, 2005)

En 1846, durante el año de la gran hambruna, Manning fue reclutado en la División de Drenaje de la Oficina Irlandesa de Obras Públicas. Después de trabajar como dibujante por un tiempo, fue nombrado ingeniero asistente de Samuel Roberts ese mismo año. En 1848, se convirtió en ingeniero de distrito, cargo que ocupó hasta 1855. Como ingeniero de distrito, leyó *Traité d'Hydraulique de D'Aubisson des Voissons*, después de lo cual desarrolló un gran interés por la hidráulica.

De 1855 a 1869, Manning fue empleado por el marqués de Downshire. Mientras supervisaba la construcción del puerto de Dundrum Bay en Irlanda, diseñó un sistema de suministro de agua para Belfast. Después de la muerte del marqués en 1869, Manning regresó a la Oficina de Obras Públicas de Irlanda como asistente del ingeniero en jefe. En 1874 se convirtió en ingeniero jefe, cargo que ocupó hasta su jubilación en 1891. Manning no recibió educación ni capacitación formal en mecánica de fluidos o ingeniería; su experiencia en contabilidad y su pragmatismo influyeron en su trabajo y lo llevaron a reducir los problemas a su forma más simple. Comparó y evaluó siete fórmulas más conocidas de la época: Du Buat (1786), Eytelwein (1814), Weisbach (1845), St. Venant (1851), Neville (1860), Darcy y Bazin (1865), y Ganguillet y Kutter (1869). Calculó la velocidad obtenida de cada fórmula para una pendiente dada y para un radio hidráulico que varía de 0,25 m a 30 m. Luego, para cada condición,

encontró el valor medio de las siete velocidades y desarrolló una fórmula que se ajustaba mejor a los datos (Ponce, 2005).

La primera fórmula de mejor ajuste fue la siguiente Ecuación 21:

$$V = 32 [RS (1 + R^{1/3})]^{1/2}$$

Ecuación 21 Primera fórmula de Manning

Luego simplificó y en 1885 incluyó el valor 2/3 en esta fórmula (Ecuación 22):

$$V = CR^{2/3}S^{1/2}$$

Ecuación 22 Segunda fórmula de Manning

En una carta a Flamant, Manning declaró: "El recíproco de C se corresponde estrechamente con el de n, tal como lo determinan Ganguillet y Kutter, siendo ambos C y n constantes para el mismo canal". El 4 de diciembre de 1889, a la edad de 73 años, Manning propuso su fórmula a la Institución de Ingenieros Civiles (Irlanda). Esta fórmula vio la luz en 1891, en un documento escrito por él que se tituló *On the flow of water in open channels and pipes*, publicado por la Institución de Ingenieros Civiles (Irlanda).

A Manning no le gustaba su propia ecuación por dos razones: Primero, era difícil en esos días determinar la raíz cúbica de un número y luego cuadrarla para llegar a un número de 2/3 de potencia. Segundo, la ecuación era dimensionalmente incorrecta. Y fue para obtener la corrección dimensional que desarrolló la siguiente Ecuación 23:

$$V = C(gS)^{1/2} [R^{1/2} + (0,22/m^{1/2})(R - 0,15m)]$$

Ecuación 23 Fórmula corregida de Manning

Donde m = "altura de una columna de mercurio que equilibra la atmósfera" y C era un número adimensional "que varía según la naturaleza de la superficie".

Sin embargo, en algunos libros de texto de finales del siglo XIX, la fórmula de Manning fue escrita de la siguiente manera (Ecuación 24):

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) R^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 24 Fórmula actual de Manning

A través de su *Manual de Hidráulica* se condujo al uso generalizado de la fórmula de Manning tal cual la conocemos hoy, así como a la aceptación de que el coeficiente C de Manning debería ser el recíproco de la n de Kutter. En los Estados Unidos, n se conoce como factor de fricción de Manning, o la constante de Manning. En Europa, el Strickler K es el mismo que el C de Manning, es decir, el recíproco de n (King & Brater, 2018).

2.6.9. Henri Bazin

Henri-Émile Bazin (1829 – 1917) (Figura 2.45) fue un hidráulico francés conocido, en particular, por la fórmula de Bazin —aplicada frecuentemente y en especial para las redes de alcantarillado—, así como por su cálculo del coeficiente de Chézy. El vertedero de Bazin tiene las siguientes características: Pared vertical con el filo vertiente horizontal, Forma rectangular, Contracción lateral eliminada, Canal de paredes verticales prolongadas aguas arriba del vertedero, Libre acceso del aire por debajo de la lámina vertida. Para el coeficiente C se tiene que m es un parámetro que depende de la rugosidad de la pared y R, el radio hidráulico (Ponce, 2015).

Después de un gran número de ensayos y experiencias realizadas en canales artificiales de diferentes secciones y rugosidades, H. Bazin en sus *Annales des Ponts et Chaussées* propuso, en 1897, como valor del coeficiente de Chézy la Ecuación 25. Esta resulta ser la fórmula simplificada de Kutter sustituyendo el valor 87 en lugar de 100, siendo m un coeficiente de rugosidad que depende de la naturaleza de las paredes del cauce natural o artificial (Bernis, 2003).

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}}$$

Ecuación 25 Fórmula de Bazin



Figura 2.45. Henri-Émile Bazin (Ponce, 2015)

La fórmula de Bazin da buenos resultados en pequeños canales artificiales, puesto que fue deducida con datos experimentales. Su solución gráfica se realizó durante mucho tiempo, mediante la aplicación del "ábaco de M. D'Ocagne", hoy sustituido por los métodos numéricos y las computadoras personales. No obstante, Bazin reprochó sus propias fórmulas iniciales, ya que para distintos grados de rugosidad de las paredes, al crecer el radio R , el coeficiente C de la ecuación de Chézy también toma diversos valores; mientras que, al aumentar la profundidad debía perder importancia la naturaleza de las paredes.

2.6.10. John Dalton

John Dalton (1766 - 1844), químico y físico británico a quien se debe la primera formulación moderna de la teoría atómica (Biografía de John Dalton, 2018). Pese a recibir una educación precaria a causa de las penurias económicas, una inagotable curiosidad y afán de conocimientos le permitieron completar su formación y obtener cierto prestigio con sus primeros trabajos científicos, los cuales versaron sobre los gases y sobre una enfermedad visual que padeció, posteriormente llamada daltonismo (Figura 2.46).



Figura 2.46. John Dalton (Biografía de John Dalton, 2018)

En 1802 calculó el balance hidrológico de Inglaterra y Gales; basado en datos recolectados pacientemente por él mismo a lo largo de su vida, dijo: "Creo que podemos concluir que la lluvia y el rocío de este país son equivalentes a la calidad de agua que corre por los ríos y que se eleva por evaporación y dado que la naturaleza actúa sobre la base de leyes generales, debemos inferir que esto mismo sucede en cualquier otro país, hasta que no se pruebe lo contrario" (Shifter, 2013).

2.6.11. William Gunn Price

En 1885, Gurley y después W. & L.E. Gurley entraron en contacto con William Gunn Price (1853-1928) para la fabricación y distribución de sus medidores de corriente patentados Price (Figura 2.47).



Figura 2.47. William Gunn Price (Frazier, 1967)

En la Figura 2.48, se muestra el medidor de corriente patentado por William Price. Era la máxima autoridad en medidores de corriente en sus días. Lo hicieron más famoso las operaciones de descarga y medición del Comité del Río Mississippi, que estuvo bajo su mando. Sus esfuerzos allanaron el camino para que Gurley entrara al campo de la fabricación de equipo hidrológico. Más tarde, en 1896, Edwin Geary Paul, para entonces jefe de mecánica del Estudio Geológico sobre EU, diseñó y desarrolló el primer medidor pigmeo en conjunto con W. & L.E. Gurley. Su escaso peso, su capacidad para desarmarse y empacarse en un muy pequeño espacio llamaron la atención de los técnicos en el campo (Frazier, 1967).



Figura 2.48. Medidores de corriente patentados Price (Frazier, 1967)

Contar las revoluciones de las ruedas de paletas durante un tiempo designado y luego multiplicar por la circunferencia fue un método para medir la velocidad del río. Comenzando con el trabajo de Joseph Saxton en la década de 1830, emergió el medidor de corriente moderno. Se convirtió en un aparato que parecía un cruce entre una veleta y un anemómetro. Bajo la supervisión del ingeniero topográfico, capitán Andrew A. Humphreys, un equipo civil y militar que inspeccionaba el bajo Mississippi en la década de 1850 desarrolló un nuevo sistema de doble flotador para medir las corrientes de los ríos. Empleó un barril de madera con peso, el cual tenía sus partes superior e inferior eliminados, y lo ató a otro barril que flotaba en la superficie. Poco después de la Guerra Civil, Daniel Farrand Henry (Frazier, 1964) en los Grandes Lagos y Theodore G. Ellis en el río Connecticut, mejoraron considerablemente los primeros metros. A Henry, generalmente, se le atribuye la producción del primer medidor de corriente telegráfico. Se produjo un contacto eléctrico durante cada revolución de las tazas del medidor. Un operador utilizó auriculares para contar los clics o empleó un instrumento que sumaba automáticamente los impulsos eléctricos. La velocidad del flujo de agua se calculó multiplicando el número de clics durante un intervalo de

tiempo designado por un "factor de medidor" único para cada máquina («Headquarters U.S. Army Corps of Engineers», 2001).

Otros hicieron sus propias contribuciones al desarrollo del medidor actual; sin embargo, probablemente la modificación más significativa ocurrió en el río Ohio en las cercanías de Paducah, Kentucky, a principios de la década de 1880. William Gunn Price, un joven topógrafo al servicio de la Comisión del río Mississippi (establecido por el Congreso en 1879 y encabezado por un oficial de ingenieros del ejército), utilizó flotadores dobles, duelas y un medidor Ellis para determinar la descarga, comparando cuidadosamente los resultados. Él se sintió insatisfecho con los tres tipos. Las carrozas dobles no dieron una lectura precisa en el nivel de profundidad media; los flotadores de varillas a menudo eran incluso menos precisos. Y, finalmente, el medidor Ellis no funcionó bien en los ríos Ohio y Mississippi porque las partículas de arena interferirían con el contacto eléctrico y arruinarían los rodamientos del aparato (Figura 2.49).



Figura 2.49. William G. Price (segundo desde la derecha) a bordo del catamarán utilizado para medir el flujo del río Ohio en Paducah, Kentucky, 1882 (Frazier, 1967).

2.6.12. T.J. Mulvaney

El método racional para máximas avenidas se le atribuye a Mulvaney (1851), quien describió el procedimiento respectivo en una publicación técnica en Irlanda. El método está basado en la suposición de que una precipitación uniforme producirá la escorrentía máxima cuando todas las partes de la cuenca están contribuyendo al caudal; debemos observar que esta suposición se da cuando la duración de la tormenta es mayor o igual al tiempo de concentración (Mulvaney, 1851). Este método fue el precursor del concepto de hidrogramas de tormentas y fue diseñado para

pequeñas cuencas urbanas que están en uso para el diseño de drenaje urbano hasta la fecha (Singh, 2018).

2.6.13. W. Rippl

En el sistema inglés para el suministro de agua de las ciudades, mediante la recolección del drenaje de una gran cuenca hidrográfica, uno de los problemas más importantes es la determinación de la capacidad de almacenamiento, que debe proporcionarse en los embalses. En los trabajos más detallados que se realizaron, este punto no recibió suficiente atención, porque en aquel momento los datos requeridos no estaban disponibles. Por lo tanto, los reservorios se construyeron de tamaño insuficiente, lo cual causó una deficiencia sensible en el suministro de agua en las estaciones secas. Como las presas de los depósitos de almacenamiento no podían elevarse en altura sin poner en peligro su estabilidad, hubo que agregar nuevos embalses y nuevos terrenos de inundación, un procedimiento a veces difícil y siempre costoso (Rippl, 1883). El método "Rippl" consiste en un diagrama para determinar requerimientos de almacenamiento. El objetivo del vaso de almacenamiento es igualar las fluctuaciones de la oferta y la demanda durante un período de tiempo infinitamente largo.

2.6.14. United States Army Corps of Engineers

La relación entre el ejército de los EE. UU. y su cuerpo de ingenieros se ha entrelazado desde el establecimiento del Cuerpo de Ingenieros el 16 de marzo de 1802. En los primeros años de la nación, dicha institución tuvo como misión centrarse en las fortificaciones militares; pero con el tiempo, esta misión se expandió para incluir el fortalecimiento de las costas, la eliminación de las barreras de navegación y la protección del medio ambiente (Izard, 2017). (Figura 2.50).



Figura 2.50. Página Web United States Army Corps of Engineers

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. es una institución permanente desde 1802 y tiene series especiales que albergan a los ingenieros que dieron forma a la hidrología e hidráulica.

2.6.15. United States Geological Survey

El Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey), es una agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos. Los científicos de la USGS estudian el terreno, los recursos naturales y los peligros naturales que los amenazan. La agencia se divide en 4 disciplinas científicas mayores: biología, geografía, geología e hidrología; su lema es Ciencia para un mundo cambiante. La USGS es la única agencia científica del Departamento del Interior de los Estados Unidos y se ha constituido en una organización investigadora sin responsabilidades reguladoras, que emplea aproximadamente a 10 000 personas y tiene su sede principal en Reston (Virginia), con importantes oficinas en Denver (Colorado) y Menlo Park (California).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos fue establecido por una ley del Congreso el 3 de marzo de 1879, a fin de proporcionar una agencia federal permanente que realizara la clasificación sistemática y científica de las tierras públicas, e hiciera un constante examen de la estructura geológica, los recursos minerales y los productos del dominio nacional. Una parte integral de esa misión incluye la publicación y diseminación de la información de la ciencia de la Tierra necesaria para comprender, planificar el uso y administrar los recursos de energía, tierra, minerales y agua de la nación («United States Geological Survey», s. f.).

Desde 1879, la función de investigación y búsqueda de hechos por parte de la USGS ha crecido y se ha modificado para satisfacer las necesidades cambiantes de la nación a la cual sirve. Como parte de su evolución, la USGS se ha convertido en la agencia de investigación de ciencias de la tierra más grande del gobierno nacional, la agencia de creación de mapas civiles más grande de la nación, la principal fuente de datos sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la nación, y el empleador del mayor número de científicos de la Tierra profesionales. Los programas de hoy sirven a una diversidad de necesidades y usuarios. Como parte de su misión, la USGS se ocupa de lo siguiente:

- Realiza y patrocina investigaciones básicas y aplicadas en geología, hidrología, mapeo y ciencias relacionadas.

- Produce y actualiza información geográfica, cartográfica y remotamente detectada en forma gráfica y digital.
- Describe el marco geológico onshore y offshore, desarrollando una comprensión de su formación y evolución.
- Evalúa los recursos energéticos y minerales, determina su origen y forma de ocurrencia, y desarrolla técnicas para su descubrimiento.
- Recopila y analiza datos sobre la cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, sobre el uso del agua y sobre la calidad de la precipitación.
- Evalúa los recursos hídricos y desarrolla una comprensión del impacto de las actividades humanas y los fenómenos naturales en los sistemas hidrológicos.
- Evalúa los peligros asociados con terremotos, volcanes, inundaciones, sequías, tóxicos, materiales, deslizamientos de tierra, hundimientos y otras fallas en el suelo, y desarrolla métodos para la predicción de peligros.
- Participa en la exploración del espacio y prepara mapas geológicos y otros de los planetas y sus satélites.
- Publica miles de informes y mapas cada año, establece y mantiene bases de datos de ciencias de la Tierra y difunde información al respecto.
- Proporciona asistencia científica y técnica para el uso efectivo de técnicas, productos e información de ciencias de la Tierra.
- Coordina el mapeo topográfico, geológico y de uso del suelo, la cartografía digital y las actividades de datos del agua.
- Desarrolla nuevas tecnologías para la recopilación, coordinación e interpretación de datos de ciencias de la Tierra.
- Proporciona apoyo científico y asesoramiento técnico para decisiones legislativas, regulatorias y de gestión.
- Coopera con más de 900 agencias federales, estatales y locales, así como con el mundo académico y la industria.

Uno de sus principales aportes es el MODFLOW, un modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el cual consiste en un código fuente que resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea (McDonald & Harbaugh, 2003). Se usa en hidrogeología para simular el flujo subterráneo de cualquier acuífero. El programa es de código libre, escrito principalmente en Fortran; puede ser compilado y corrido en los sistemas operativos DOS, Windows o Unix y hace uso de una malla tridimensional. Desde que el modelo original fue desarrollado en los años

en otros puntos en los Estados y Territorios... y para dar aviso en el norte (Gran) Lagos y en la costa por telégrafo magnético y señales marinas, del enfoque y la fuerza de las tormentas ". La agencia fue colocada bajo la supervisión del Secretario de Guerra, puesto que el Congreso consideró que "la disciplina militar probablemente aseguraría la mayor prontitud, regularidad y precisión en las observaciones requeridas". Dentro del Departamento de Guerra, fue asignado al Servicio de Señales del Ejército de EE. UU., bajo la tutela del General de Brigada Albert J. Myer. El general Myer le dio su primer nombre al Servicio Meteorológico Nacional: la División de telegramas e informes para el beneficio del comercio (US Department of Commerce, s. f.).

2.6.17. Otros investigadores

Coulomb, Charles Agustín (1736-1806). A pesar de que sus mayores contribuciones a la ciencia fueron realizadas durante el siglo XVIII, su influencia en la hidráulica se dio al final de su vida. Compiladas en un trabajo llamado *Expériences destinées à déterminer la cohérence des fluides et les lois de leur résistance dans les mouvements très lents* donde se encuentran los resultados de sus experimentos, a partir de los cuales relaciona la viscosidad de los fluidos con el número de moléculas, su inercia cuando chocan contra obstáculos y su velocidad (Ochoa, s. f.).

Eytelwein, Johan Albert (1764-1848). Presentó una fórmula para canales abiertos, muy similar a la de Chézy, aunque a partir de trabajos diferentes.

Girard, Pierre Simon (1765-1836). Propuso una relación entre la pendiente y la primera y segunda potencias de la velocidad para la resistencia de cuerpos sumergidos. Sostuvo que la primera potencia de la velocidad se debía a los efectos de la adherencia y la segunda a la superficie de contacto; sin embargo, al coeficiente C no lo evaluó ni confirmó la validez de su formulación.

Riche de Prony (1755-1810). Luego de estudiar los trabajos de Chézy y Du Buat, se inclinó por la forma de la ecuación propuesta por Coulomb y propuso a su vez fórmulas para tuberías y canales, estimando todos los coeficientes como independientes de la naturaleza de la superficie frontera.

Bidone, Giorgio (1781-1839). Prestó considerable atención a la contracción y "percusión" de chorros de agua y a la descarga de

vertederos. Su última investigación intentaba formular el perfil de la superficie libre. También se le atribuye el descubrimiento del resalto hidráulico, conocido en Italia como "resalto de Bidone".

Venturoli, Giuseppe (1781-1839). Se interesó en el problema de la resistencia en tubos y canales, además fue el primero en analizar el aspecto inercial del establecimiento de flujo. Aunque su nombre rara vez es citado, fue el primero en derivar la ecuación fundamental para remansos de canales rectangulares.

Navier, Louis Marie Henry (1785-1836). Desarrolló una ecuación diferencial para describir el movimiento de los fluidos modificando las ecuaciones de Euler, partiendo de un análisis netamente teórico. Esta ecuación no pudo ser interpretada hasta cierto tiempo después.

Los hermanos alemanes Ernst Heinrich Weber (1795-1878) y Wilhelm Eduard Weber (1804-1891). Publicaron en 1825 un libro sobre experimentos con ondas donde describieron, de manera muy aproximada, el perfil de flujo en canales relativamente angostos; aunque de manera muy cualitativa, sin relacionarla con la teoría existente.

Burdin, Claude (1790-1873). Trabajó en el desarrollo de la primera turbina hidráulica digna de nombre e introdujo la palabra "turbina" dentro de la terminología ingenieril. Su aparato incluía el flujo libre del agua hacia fuera desde unas aspas centrífugas que giran alrededor de un eje vertical.

Fourneyron, Benoit (1802-1867). Continuó el desarrollo de la idea original de Burdin y demostró que era ejecutable. Construyó más de cien turbinas similares para varias partes del mundo, además de patentar la turbina de flujo sumergido.

Belanger, Jean Baptiste (1789-1874). Derivó la ecuación elemental del remanso independiente de Venturoli. Desarrolló una ecuación diferencial basada en la ecuación de flujo uniforme de Prony, la cual aplicó en varios casos de flujo en canales prismáticos para la integración por pasos. Asimismo, introdujo el concepto de descarga máxima en vertederos de cresta ancha.

Vauthier, Perre (1784-1847). Trabajó en los estudios de Belanger, simplificando sus expresiones y ampliando su campo de aplicación a canales no prismáticos; además, relacionó el resalto hidráulico con la ecuación del remanso.

Coriolis, Gaspard Gustave de (1792-1843). Derivó la ecuación del remanso basándose en el principio de trabajo-energía en el cual la tasa de aplicación de trabajo, realizado tanto por la resistencia externa como la interna, puede ser expresado como el producto de la velocidad media y la resistencia de frontera local. Introdujo el coeficiente de Coriolis.

Russell, John Scott (1808-1882). Realizó numerosos estudios sobre navegación mostrando que la resistencia ejercida por el agua primero tiende a aumentar y repentinamente se vuelve menor que la dada por la ley del cuadrado de la velocidad, dependiendo del patrón longitudinal de la formación de olas. A partir de dichos descubrimientos realizó diversos estudios sobre la propagación de las ondas en líquidos.

Reech, Ferdinand (1805-1880). Fue el primero en expresar lo que hoy es conocido como criterio de similitud de Froude. Además de realizar importantes avances en ingeniería naval, especialmente en propulsión.

Hagen, Gothilf Heinrich Ludwig (1797-1884). Realizó numerosos estudios sobre resistencia en tuberías y canales abiertos, entre ellos, el efecto de la temperatura en la resistencia a través de tubos de diámetro pequeño. Obtuvo así expresiones para flujo turbulento, incluso antes que Reynolds.

Stokes, George Gabriel (1819-1903). Formuló teorías sobre la fricción interna de fluidos en movimiento y derivó la ecuación de Navier-Stokes hasta la forma como la conocemos hoy. Además de esto desarrolló la ley que lleva su nombre.

Weisbach, Julius (1806-1871). Su máximo trabajo fue *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik*, un compendio de tres volúmenes a partir del cual moderniza y convierte la mecánica de fluidos en una parte integral de la ingeniería. Trabajó en áreas como dinámica de fluidos, equilibrio y presión del agua en vasos, equilibrio del agua con otros cuerpos, acción molecular del agua, equilibrio y presión del aire, teoría de flujo del agua, contracción del chorro, flujo de agua en tuberías, resistencia a contracciones y expansiones, flujo bajo presión variable, flujo de aire y otros fluidos, flujo en canales y ríos, medición del agua e impulso y resistencia de fluidos. Fue el primero en escribir la ecuación de resistencia para tuberías, además de extender la fórmula para vertederos.

Francis, James Bicheno (1815-1892). Mejoró el funcionamiento de la turbina de Fourneyron, mediante trabajos individuales; en la actualidad, se utiliza ampliamente el tipo de turbina que lleva su nombre.

Saint-Venant, Jean Claude Barré de (1797-1886). Además de sus trabajos sobre elasticidad, escribió extensamente sobre hidráulica con atención particular en el movimiento de olas, la resistencia en tubos y canales abiertos, el flujo gradualmente variado y el flujo de aire. Se asocian con su nombre, el análisis del orificio sónico, el término "celeridad" para distinguir la velocidad de propagación de ondas con respecto al fluido de la velocidad del fluido mismo, y la diferenciación entre ríos y torrentes en términos de la pendiente crítica para flujo uniforme.

Bresse, Antoine Charles (1822-1883). Formuló correctamente las características del resalto hidráulico y la integral de la ecuación de flujo gradualmente variado. Además de preparar tablas para dicha ecuación, aún utilizadas en la actualidad.

Boudin, Emmanuel Joseph (1820-1893). Clasificó los perfiles superficiales en A y B dependiendo de si la profundidad normal era mayor o menor que la crítica y en los tipos 1, 2 y 3, dependiendo de si la profundidad era mayor que la normal y la crítica, entre ellas o más abajo que ambas.

Osborne Reynolds (1842-1912). El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. El concepto fue introducido por George Gabriel Stokes en 1851, pero el número de Reynolds fue nombrado por Osborne Reynolds, quien popularizó su uso en 1883.

Helmholtz, Hermann Ludvig Ferdinand von (1821-1894). Presentó el análisis dimensional para ecuaciones de movimiento de fluidos, que actualmente se conocen como criterios de Froude, Reynolds y Mach para similitud modelo-prototipo.

Kirchhoff, Gustav Robert (1824-1887). Describió el perfil de chorro, así también sentó los principios para el estudio de la cavitación en flujo a superficie libre y realizó trabajos sobre vertederos.

Thomson, William (Lord Kelvin) (1824-1907). Avanzó en el análisis del flujo irrotacional, movimiento de vórtices, mareas, ondas en canales abiertos, ondas generadas por barcos y ondas capilares, entre otros. Introdujo el término "turbulencia" para designar el estado de movimiento más allá del número de Reynolds crítico.

Lilienthal, Otto (1848-1896). Realizó variados experimentos con el túnel de viento, lo que permitió a su hermano Gustav volar el primer planeador.

Reynolds, Osborne (1842-1912). Relacionó correctamente las fuerzas viscosas con las fuerzas de inercia para el movimiento de líquidos, utilizando la viscosidad para separar el flujo turbulento del laminar. Además, derivó las ecuaciones de movimiento para flujo turbulento. Fue el primero en demostrar el fenómeno de la cavitación.

Froude, William (1810-1879) y Robert Edmund (1846-1924). Padre e hijo tuvieron gran interés en barcos y en tanques, por lo cual relacionaron correctamente las fuerzas gravitacionales de las inerciales y desarrollaron métodos de predicción para flujo en canales.

Pelton, Lester Allen (1829-1908). Desarrolló la rueda que lleva su nombre, que es muy usada actualmente.

Boussinesq, Joseph (1842-1929). Mediante métodos puramente matemáticos, elaboró diferentes ecuaciones para el comportamiento de fluidos en canales y tuberías. Mejorando aun las ecuaciones de Coriolis y su constante.

Herschel, Clemens (1842-1930). Inventó un aparato denominado medidor de agua Venturi, además de mejorar los trabajos de Francis.

Freeman, John Ripley (1855-1932). Trabajó sobre la resistencia en mangueras, tubos y accesorios, cuyos resultados publicados después de su muerte se convirtieron en base para muchas aplicaciones hidráulicas de la actualidad.

2.7. Periodo de Empirismo (1900 a 1930)

Aunque muchos trabajos de hidrología moderna fueron iniciados en el siglo XIX, el desarrollo en hidrología cuantitativa fue todavía inmaduro; por ende,

en aquel tiempo la ciencia de la hidrología fue enormemente empírica, debido a que la base física para varias determinaciones hidrológicas no era muy conocida, o bien porque se disponía de mucha información cuantitativa experimental para ser usada. Durante la parte final del siglo XIX y los siguientes 30 años, el empirismo hidrológico fue evidente, por ejemplo: cientos de fórmulas empíricas fueron propuestas, seleccionando sus coeficientes y parámetros en base al juicio y la experiencia.

2.7.1. *Bureau of Reclamation*

Las precipitaciones inadecuadas en el oeste de Estados Unidos requirieron que los colonos usaran el riego para la agricultura. Al principio, los colonos simplemente desviaron el agua de las corrientes, pero en muchas áreas la demanda excedió el suministro. A medida que aumentaba esta demanda, los colonos buscaban almacenar la escorrentía "desperdiciada" de las lluvias y la nieve para su utilización posterior, maximizando así el uso procurando que haya mayor agua disponible en temporadas más secas. En ese momento, se llevaron a cabo proyectos de almacenamiento y riego privados y patrocinados por el Estado; no obstante, a menudo fracasaron debido a la falta de dinero y/o la falta de habilidades de ingeniería («Bureau of Reclamation», s. f.).

El gobierno federal recibió presión para que emprenda proyectos de almacenamiento y riego. El Congreso ya había invertido en la infraestructura de los Estados Unidos a través de subsidios a carreteras, navegación fluvial, puertos, canales y ferrocarriles. Los occidentales querían que el gobierno federal también invirtiera en proyectos de irrigación en el oeste («Bureau of Reclamation», s. f.). El movimiento de irrigación demostró su fortaleza cuando los tablones pro-irrigación llegaron a las plataformas demócrata y republicana en 1900. La oposición del este y medio oeste en el Congreso se calmó cuando los occidentales se infiltraron y mandaron un proyecto de ley que contenía ríos y albergaba proyectos favorecidos por los opositores de la irrigación occidental. El Congreso aprobó la Ley de Recuperación del 17 de junio de 1902. Desde entonces, dicha Ley exige que los usuarios del agua reembolsen los costos de construcción con los cuales recibieron los beneficios.

En aquellos días, los proyectos de riego se conocían como proyectos de "recuperación". El concepto era que el riego "recuperaría" tierras áridas para uso humano. Los partidarios de la irrigación creían que los programas de recuperación alentarían el asentamiento occidental, creando hogares

para los estadounidenses en las granjas familiares. El presidente Theodore Roosevelt apoyó el movimiento de reclamación debido a su experiencia personal en Occidente y porque creía en su propio potencial («Bureau of Reclamation», s. f.).

En julio de 1902, de conformidad con la Ley de Recuperación, el Secretario del Interior, Ethan Allen Hitchcock, estableció el Servicio de Reclamación dentro del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Esta nueva agencia estudió posibles proyectos de desarrollo de agua en cada estado occidental con tierras federales: los ingresos provenientes de la venta de estas tierras constituyeron la fuente inicial del financiamiento del programa. Debido a que Texas no tenía tierras federales, no se convirtió en un estado de Recuperación hasta 1906 cuando el Congreso aprobó una ley especial que lo incluía en las disposiciones de la Ley de Recuperación.

De 1902 a 1907, el Servicio de Reclamaciones comenzó aproximadamente 30 proyectos en estados occidentales. Luego, en 1907, el Secretario del Interior lo separó del USGS y creó una oficina independiente dentro del Departamento del Interior. En los primeros años, muchos proyectos encontraron problemas como los que se mencionan a continuación: las tierras/suelos incluidos en los proyectos no eran aptos para el riego; la especulación de la tierra a veces resultó en patrones de asentamiento pobres; los irrigadores que tenían una alta preparación de la tierra y los costos de construcción de las instalaciones no podían satisfacer los programas de amortización propuestos; los colonos no tenían experiencia en agricultura de riego; el anegamiento de tierras de regadío requería costosos proyectos de drenaje; a los que se sumó la construcción de grandes proyectos en áreas que solo podían sembrar cultivos de bajo valor. En 1923, la agencia pasó a llamarse "Bureau of Reclamation". Entonces, ante el creciente malestar de los colonos y los problemas financieros para el programa de recuperación, en 1924 el "Informe del Buscador de hechos" destacó dichos problemas con el objetivo de solucionarlos. A fines de 1924, la Ley de búsqueda de hechos pretendió resolver algunos de los problemas financieros y de otro tipo.

En 1928, el Congreso autorizó el proyecto Boulder Canyon (Hoover Dam) y grandes apropiaciones comenzaron, por primera vez, a fluir al Bureau of Reclamation desde los fondos generales de los Estados Unidos. La autorización se produjo solo después de un debate muy disputado sobre los pros y los contras del poder público versus el poder privado.

2.7.2. *Waterways Experiment Station*

La Waterways Experiment Station —también conocida como WES-Original Cantonment en Vicksburg, Mississippi— es un extenso complejo de 673 acres (272 ha) construido en 1930 como un centro de investigación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Su campus es el sitio de la sede del Centro de Investigación y Desarrollo de Ingenieros (ERDC). WES es el más grande de los cuatro laboratorios de investigación y desarrollo del Corps of Engineers.

El Modelo de Cuenca del Mississippi resultó el proyecto individual más grande emprendido por WES. Fue iniciado por el entonces jefe de ingenieros, Eugene Reybold, en 1943. La construcción tuvo lugar desde 1947 hasta 1966, y su alcance incluyó la mayor parte del río Mississippi y sus afluentes (excluyendo el alcance superior y el alcance inferior debajo de Baton Rouge). El modelo parcialmente completado se utilizó para crear estrategias de control de inundaciones, durante la inundación de abril de 1952 en el río Missouri (Tiffany, 1968).

2.7.3. *International Association of Hydrological Sciences*

La International Association of Hydrological Sciences (IAHS) es una organización científica no gubernamental sin fines de lucro, comprometida con la ciencia de la hidrología y la comunidad mundial de hidrólogos. La IAHS se estableció en 1922, y en la actualidad reclama una membresía superior a 8000, de más de 130 países. Diez comisiones científicas internacionales se ocupan del ciclo hidrológico, los recursos hídricos y las técnicas específicas («International Association of hydrological Sciences [IAHS]», s. f.). Otros grupos de trabajo e iniciativas abordan problemas particulares.

La primera participación de la hidrología en la cooperación científica internacional, se dio en la Asamblea General de IUGG en Roma, en 1922, cuando un delegado italiano propuso una moción para abrir dentro de la Unión la posibilidad de tratar con la hidrografía. Entonces, se creó un comité para emitir su opinión sobre la conveniencia de una actividad tan nueva. El comité dio un consejo favorable con la enmienda de que el nombre del nuevo organismo debería ser "Rama Internacional de Hidrología Científica". La especificación "científica" se añadió para distinguir a los nuevos participantes de los charlatanes y los simplones que, con la ayuda de todo tipo de varillas, intentaron encontrar agua y se



Figura 2.47. Logotipo Global Water Partnership (GWP)

El concepto para la creación de GWP surgió de la Conferencia de Estocolmo en Medio Ambiente realizada en 1972, la Conferencia de Mar del Plata de 1977, la Declaración de Dublín en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Ambiente y Desarrollo (UNCED) de enero de 1992, la Declaración "Protection of the Quality & Supply of Freshwater Resources: Application of Integrated Approaches to the Development, Management & Use of Water Resources" (Capítulo 18 de la Agenda 21 de la Conferencia de Río), así como de una insatisfacción general con la carencia de un análisis sostenible colocando metas políticas hídricas y una planeación hídrica (Global Water Partnership [GWP], 2018).

GWP fomenta la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) y provee un foro para el diálogo entre corporaciones, agencias gubernamentales, usuarios del agua y grupos ambientales con el objetivo de promover la estabilidad a través del desarrollo sostenible de los recursos hídricos, la gestión y el uso (GWP, 2018). La red está abierta a todas las organizaciones involucradas en la gestión de los recursos hídricos: instituciones gubernamentales de países desarrollados o en vías de desarrollo, agencias de Naciones Unidas, bancos de desarrollo bi o multilaterales, asociaciones profesionales, instituciones de investigación, organizaciones no gubernamentales y el sector privado.

El Secretariado de GWP se ubica en Estocolmo, Suecia; no obstante, la red de GWP trabaja en 13 regiones: África del Sur, GWP África del Este, África Central, África del Oeste, el Mediterráneo, Europa Central y del Este, el Caribe, Centroamérica (GWP Centroamérica), Sudamérica, Asia del Sudeste y China. Siendo apoyada financieramente por Canadá, Dinamarca, la Comisión Europea, Finlandia, Francia, Alemania, Holanda, Noruega, Suecia, España, Suiza, el Reino Unido y Estados Unidos.

