

Edwin M. Pino Vargas



La Hidrología en el tiempo:

Una revisión histórica

La Hidrología en el tiempo: *Una revisión histórica*

Edwin M. Pino Vargas

© La Hidrología en el tiempo: Una revisión histórica

1ra. Edición, Tacna mayo 2019

© 2019, Edwin M. Pino Vargas

© 2019, Fondo Editorial - Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Dirección editorial: Av. Miraflores s/n - Tacna

Diseño de portada y diagramación: José Luis Choque Dávila

Revisión técnica: Jesús A. Mejía Marcacuzco

Revisión de estilo: Gabriela Caballero Delgado

Impresión: Graficom E.I.R.L. /Arias Aragüez 490-A

Tiraje: 200

ISBN: 978-612-46338-8-1

Depósito Legal

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2019-07915

© Reservados todos los derechos de esta edición.

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra en cualquier medio, sea electrónico o mecánico, sin el consentimiento previo y por escrito del editor.

Impreso en Perú

Printed in Peru

La Hidrología en el tiempo: *Una revisión histórica*

Edwin M. Pino Vargas

DEDICATORIA

A Dios por permitirme vivir al lado de mis amores y que son la razón de mi vida: mi esposa Mely y mis adoradas hijas Claudia y Diana. A mis queridos padres, Fermín y Nélica, quienes supieron dar el rumbo adecuado a mi vida.

A todos los hombres y mujeres que, desde los inicios de la vida en nuestro planeta, impulsaron el uso adecuado del agua.

AGRADECIMIENTO

Un sincero agradecimiento al Dr. Jesús Mejía, ex rector de la Universidad Nacional Agraria La Molina, profesor y guía de quien obtuve formación académica de alta rigurosidad y fue, además, el encargado de la revisión de este material bibliográfico.

Al Vicerrectorado de Investigación, Instituto General de Investigación y Fondo Editorial de la UNJBG, por dar la rigurosidad necesaria para lograr que este material tenga la calidad deseada, en términos de contenido y edición.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1.	Definición de Hidrología	23
1.1.1.	En la antigüedad	23
1.1.2.	En la actualidad	24
1.2.	Facetas y Tipos de Hidrología	24
1.2.1.	Clasificación General	24
1.2.2.	Escala Temporal	25
1.2.3.	Regiones Climáticas	26
1.2.4.	Regiones Ecológicas	26
1.2.5.	Regiones Geomórficas	28
1.2.6.	Metodologías	31
1.2.7.	Tópicos	35
1.2.8.	Campos Relacionados	39
2.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA	
2.1.	Reseña General	47
2.2.	Periodo de Especulación (antigüedad mayor a 1400)	48
2.2.1.	Cultura Americana	48
2.2.2.	Cultura Griega	56
2.2.3.	Cultura Romana	60
2.2.4.	Cultura Persa	62
2.2.5.	Cultura China	63
2.2.6.	Cultura Egipcia	64
2.3.	Periodo de Observación (1400 a 1600)	65
2.3.1.	Leonardo da Vinci	65
2.3.2.	Bernard Palissy	66
2.4.	Periodo de Medición (1600 a 1700)	69
2.4.1.	Athanasius Kircher	69
2.4.2.	Jean Francois	70
2.4.3.	Pierre Perrault	70
2.4.4.	Edme Marriotte	72
2.4.5.	Edmund Halley	73
2.5.	Periodo de Experimentación (1700 a 1800)	74
2.5.1.	Daniel Bernoulli	74
2.5.2.	Antoine Chézy	80
2.5.3.	Jean le Rond d'Alembert	82
2.5.4.	Henri Pitot	83
2.6.	Periodo de Modernización (1800 a 1900)	84
2.6.1.	Jean Poiseuille	84
2.6.2.	Henry Darcy	85

2.6.3.	<i>Jules Dupuit</i>	89
2.6.4.	<i>Günther Thiem</i>	93
2.6.5.	<i>Ghyben-Herzberg</i>	94
2.6.6.	<i>Ganguillet y Kutter</i>	95
2.6.7.	<i>A. Humphreys y L. Abbot</i>	96
2.6.8.	<i>Robert Manning</i>	97
2.6.9.	<i>Henri Bazin</i>	100
2.6.10.	<i>John Dalton</i>	101
2.6.11.	<i>William Gunn Price</i>	102
2.6.12.	<i>T. J. Mulvaney</i>	104
2.6.13.	<i>W. Rippl</i>	105
2.6.14.	<i>United States Army Corps of Engineers</i>	105
2.6.15.	<i>United States Geological Survey</i>	106
2.6.16.	<i>National Weather Service</i>	108
2.6.17.	<i>Otros investigadores</i>	109
2.7.	Periodo de Empirismo (1900 a 1930)	113
2.7.1.	<i>Bureau of Reclamation</i>	114
2.7.2.	<i>Waterways Experiment Station</i>	116
2.7.3.	<i>International Association of Hydrological Sciences</i>	116
2.7.4.	<i>American Geophysical Union</i>	117
2.8.	Periodo de Racionalización (A partir de 1930)	118
2.8.1.	<i>L. K. Sherman</i>	118
2.8.2.	<i>Robert E. Horton</i>	119
2.8.3.	<i>Charles V. Theis</i>	121
2.8.4.	<i>Emil Julius Gumbel</i>	122
2.8.5.	<i>Allen Hazen</i>	124
2.8.6.	<i>Vonnegut Bernard</i>	125
2.8.7.	<i>Albert Einstein</i>	126
2.8.8.	<i>Hans Albert Einstein</i>	129
2.8.9.	<i>L. A. Richards</i>	130
2.8.10.	<i>Natural Resources Conservation Service</i>	131
2.9.	Periodo de Teorización, Globalización y Virtualización (A partir de 1950)	132
2.9.1.	<i>Stanford Watershed Model</i>	132
2.9.2.	<i>Hydrologic Engineering Center</i>	134
2.9.3.	<i>United States Environmental Protection Agency</i>	137
2.9.4.	<i>Illinois State Water Survey</i>	138
2.9.5.	<i>Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura</i>	139
2.9.6.	<i>Organización Meteorológica Mundial</i>	140
2.9.7.	<i>Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura</i>	141
2.9.8.	<i>Global Water Partnership</i>	142

3.	LA HIDROLOGÍA EN EL PERÚ	
3.1.	Antecedentes	147
3.2.	El Manejo del Agua en el Perú	149
3.3.	Legislación de Aguas en el Perú	152
3.4.	Instituciones Referentes al Manejo y Gestión del Agua	145
3.4.1.	Dirección de Hidrografía y Navegación	154
3.4.2.	Ministerio de Agricultura y Riego	156
3.4.3.	Ministerio del Ambiente	157
3.4.4.	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú	157
3.4.5.	Autoridad Nacional del Agua	160
3.4.6.	Universidades y La Hidrología	161
3.4.6.1.	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS	161
3.4.6.2.	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	163
3.4.6.3.	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA	166
3.4.6.4.	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	168
4.	INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA	
4.1.	Generalidades	173
4.2.	Tecnología Satelital	173
4.2.1.	Antecedentes Históricos	173
4.2.2.	Sensores y Satélites	175
4.2.3.	Estaciones Terrestres	177
4.2.4.	Modelos de Sistemas Terrestres	178
4.2.5.	Aplicaciones de Datos Satelitales	179
4.3.	Vehículos No Tripulados	182
4.3.1.	Antecedentes Históricos	182
4.3.2.	Tipos de Vehículos No Tripulados	187
4.3.3.	Clasificación de los drones	189
4.3.4.	Drones en la Hidrología	191
4.4.	Modelación de Sistemas Hidrológicos	193
4.4.1.	Antecedentes Históricos	193
4.4.2.	Tipos de Modelos	195
5.	BIBLIOGRAFÍA	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Conceptualización errónea del ciclo hidrológico (Sánchez, 2017)	23
Figura 2.1. Periodos o etapas de desarrollo de la hidrología (Campos, 1992)	47
Figura 2.2. (a) Ciudadela Caral. (b) Protección de riberas en Caral (EDITORA, 2017)	49
Figura 2.3. Acueductos de Cantalloc, Nasca (Vargas, 2013)	50
Figura 2.4. Acueducto en Palenque Maya (Agua & Ambiente, 2015)	51
Figura 2.5. Área de Machacmarca, con una colina adosada, waru-warú y un canal en forma de serpiente (Sparavigna, 2013)	52
Figura 2.6. (a) Represamiento inca Saquicocha. (b) Negra Huacanan (Ancajima, 2014)	52
Figura 2.7. Amuna de Huarochirí	53
Figura 2.8. (a) Sistema de andenes en Tipón. (b) Moray - Cusco (Ancajima, 2014)	54
Figura 2.9. Los andenes de Maras, construidos para almacenar las aguas saladas (Ancajima, 2018)	55
Figura 2.10. (a) Canal Cumbemayo, "tallado" en piedra. (b) Andenes en el Valle Sagrado de los Incas, Pisac ("Agricultura inca", s. f.)	55
Figura 2.11. Canales de abastecimiento de agua, ciudadela de Machu Picchu (Natura, 2013)	56
Figura 2.12. Thales de Miletus (O'Grady, s. f.)	57
Figura 2.13. Aristóteles (Kenny, s. f.)	58
Figura 2.14. Anaximander de Miletus (Couprie, s. f.)	58
Figura 2.15. Empédocles de Agrigentum (Campbell, s. f.)	59
Figura 2.16. Anaxágoras de Clazomene (Patzia, s. f.)	59
Figura 2.17. Theophrastus (Anónimo, s. f.)	60
Figura 2.18. Marcus Vitruvius Pollio (Enciclopedia Biográfica en Línea, s. f.)	61
Figura 2.19. (a) Acueducto Romano, (b) Excavación de túneles (National Geographic, 2014)	61
Figura 2.20. Qanats de Persia (UNESCO, 2014)	63
Figura 2.21. Sistema de Zhou, atribuido a Shum (Wu, 1982)	63
Figura 2.22. Riego en la cultura egipcia (Colin, 2008)	64
Figura 2.23. Nilómetros para registro de niveles del río (Postel, s. f.)	65
Figura 2.24. Medición de velocidad Leonardo da Vinci (Chow et al., 1988)	66
Figura 2.25. (a) Bernard Palissy. (b) Publicación en francés (Williams, 2017) (Palissy, 1580)	67
Figura 2.26. Athanasius Kircher S.J. (Bloemaert, s. f.)	69
Figura 2.27. Arts des Fontaines et Science des Eaux. Jean Francois (François, 1653)	70
Figura 2.28. Pierre Perrault in 1656 (Brutsaert, 2005)	71
Figura 2.29. (a) Edme Mariotte. (b) Libro <i>El movimiento del agua y otros fluidos</i> (Desaguliers, 1718)	72

Figura 2.30. (a) Daniel Bernoulli. (b) Libro <i>Hidrodinámica</i> (C. Truesdell, 1984)	75
Figura 2.31. Antoine Chézy (Ponce, 2015)	80
Figura 2.32. Jean le Rond d'Alembert (Gonçal, 2014)	82
Figura 2.33. (a) Henri Pitot. (b) Tubos de Pitot. (c) Mediciones en campo (G. Brown, 2003)	83
Figura 2.34. (a) Jean Poiseuille. (b) Elevación frontal aparato de Poiseuille (1846) (Sutera & Skalak, 1993)	84
Figura 2.35. (a) Henry Darcy, (b) Tubo de Pitot mejorado: 1968, 1957, 1956 (Brown, 2003)	85
Figura 2.36. Boquillas diseñadas por Henry Darcy (a) 1856, (b) 1858, (c) 1865 (G. Brown, 2003)	86
Figura 2.37. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon (Darcy, 1856)	86
Figura 2.38. Columna de arena original de Henry Darcy (Darcy, 1856)	87
Figura 2.39. Jules Dupuit (G. Brown, 2004)	90
Figura 2.40. Flujo al contorno de una isla (Dupuit, 1863)	92
Figura 2.41. Solución Dupuit para flujo a un pozo (Dupuit, 1863)	93
Figura 2.42. Relación Ghyben-Herzberg (Verruijt, 1968)	94
Figura 2.43. Reporte sobre observaciones en el río Mississippi	97
Figura 2.44. Robert Manning (Ponce, 2005)	98
Figura 2.45. Henri-Émile Bazin (Ponce, 2015)	101
Figura 2.46. John Dalton (Biografía de John Dalton, 2018)	102
Figura 2.47. William Gunn Price (Frazier, 1967)	102
Figura 2.48. Medidores de corriente patentados Price (Frazier, 1967)	103
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).	104
Figura 2.50. Página Web United States Army Corps of Engineers	105
Figura 2.51. (a) Simulación MODFLOW en DOS. (b) Malla tridimensional	108
Figura 2.52. (a) Charles V. Theis. (b) Publicación de Charles Theis en 1952 (Theis, 1952)	121
Figura 2.53. Emil Julius Gumbel (Ponce, 2018)	122
Figura 2.54. Allen Hazen ("Hazen-Williams coefficient This Day in Water History", 2013)	124
Figura 2.55. Vonnegut Bernard (Macho, 2014)	126
Figura 2.56. (a) Albert Einstein, el genio del siglo XX. (b) Escultura en el Parque de las Ciencias de Granada	127
Figura 2.57. Artículo de Einstein sobre los meandros (Einstein, 1926)	128
Figura 2.58. Reporte de Hans Albert Einstein (1968) (Rocha, 2010)	130
Figura 2.59. Forma general del Stanford Watershed Model or SWM (after Crawford and Linsley, 1966)	133
Figura 2.60. Evolución watershed modeling, 1960 - 2004 (Imhoff & Donigian, 2005)	134
Figura 2.61. Logotipo identificación US Army Corps of Engineers	135
Figura 2.62. (a) EPA (Environmental Protection Agency). (b) SWMM (Storm Water Management Model)	137

Figura 2.63. Logotipo Illinois State Water Survey	138
Figura 2.64. Logotipo Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura	139
Figura 2.65. Logotipo Organización Meteorológica Mundial	141
Figura 2.66. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)	141
Figura 2.67. Logotipo Global Water Partnership (GWP)	143
Figura 3.1. Inundaciones en el Perú ("Inundaciones causan daños por segundo día consecutivo en Lima, Perú", 2017)	151
Figura 3.2. Perú: Dramático momento vivió mujer cuando fue arrastrada por huaico (Redacción, 2017)	151
Figura 3.3. Brigada de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú	154
Figura 3.4. Dirección de Hidrografía y Navegación, Marina de Guerra del Perú	155
Figura 3.5. Promulgan Ley Orgánica del SENAMHI 14 de diciembre de 1984	158
Figura 3.6. Logotipo SENAMHI	158
Figura 3.7. Logotipo Autoridad Nacional del Agua	160
Figura 3.8. Escudo de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos	162
Figura 3.9. (a) Eduardo de Habich. (b) Escudo UNI	163
Figura 3.10. Laboratorio Nacional de Hidráulica	166
Figura 3.11. Escudo de la Universidad Nacional Agraria La Molina	167
Figura 3.12. Escudo de la Pontificia Universidad Católica del Perú	168
Figura 4.1. Landsat- Satélites y sensores	176
Figura 4.2. GPM Constellation Status	177
Figura 4.3. Estaciones de la red terrestre de Landsat	178
Figura 4.4. Modelos de sistemas terrestres	178
Figura 4.5. Monitoreo de la cuenca del río Nilo	180
Figura 4.6. Equilibrio hidrológico en la cuenca del Nilo	180
Figura 4.7. Sistema de administración de riego	181
Figura 4.8. Mapas de sequías en Navajo	181
Figura 4.9. Mapa Inundaciones en Carolina del Sur (EEUU)	182
Figura 4.10. Globos aerostáticos no tripulados	183
Figura 4.11. El avión automático Hewitt-Sperry	184
Figura 4.12. Avión bomba GB-1 Glide	185
Figura 4.13. El famoso Firebee de la compañía Ryan	185
Figura 4.14. Aeronave icónica en la guerra de Vietnam	186
Figura 4.15. Modelo Aquila RPV-drone	186
Figura 4.16. F-4 Phantom	187
Figura 4.17. MQ 9 Reaper Drone	187
Figura 4.18. Drone terrestre	188
Figura 4.19. Drones acuáticos	188
Figura 4.20. Drones aéreos	189
Figura 4.21. Drone tipo multirrotor hexacóptero	190
Figura 4.22. Drone Tipo Helicóptero	190
Figura 4.23. Drone Tipo Ala Fija	191
Figura 4.24. División de una cuenca y conceptualización de la red de drenaje en subcuencas (izquierda) y en subunidades artificiales (derecha).	195

Figura 4.25. Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos.	197
Figura 4.26. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos.	197
Figura 4.27. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido.	198

Prefacio

La ***Hidrología en el tiempo: una revisión histórica*** es un libro que transmite las experiencias del autor tras el dictado de cursos relacionados a recursos hídricos a lo largo de más de 30 años de su vida profesional y cuya lectura otorgará al lector el desarrollo de la hidrología y de los recursos hídricos a través de la historia de manera clara, tema de interés para estudiantes y profesionales de ingeniería civil, agrícola, ciencias agrarias, ambientales y de otras carreras que tengan relación con el manejo y gestión del agua.

El libro en su parte introductoria define la hidrología como "Ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos" y presenta una clasificación de la hidrología compuesta de 106 tipos; lo que indica la importancia de la hidrología como ciencia aplicada a las diferentes ramas de la ingeniería y ciencias naturales.

Más adelante el autor describe e ilustra con claridad la evolución y desarrollo de la hidrología desde antes del periodo 1400 d.C. donde filósofos como Homero, Tales, Platón, Aristóteles, Séneca y Plinio especularon sobre la concepción del ciclo hidrológico; resaltando los trabajos realizados por la cultura griega, cultura romana, cultura persa, cultura china y cultura egipcia y el extraordinario aporte, descrito con claridad ilustrada, de culturas peruanas como Caral, Nazca e Inca sobre el manejo eficiente del agua a través de sistemas de andenes, amunas, canales, sistemas de acueductos, cochas, waru waru, entre otros. En esta parte del libro, el autor define periodos de evolución de la hidrología en Periodo de Especulación, Periodo de Observación, Periodo de Medición, Periodo de Experimentación, Periodo de Modernización, Periodo de Empirismo, Periodo de Racionalización y Periodo de Teorización, Globalización y Virtualización. En cada uno de ellos se describen acontecimientos relevantes sobre el desarrollo de la hidrología con citación de hechos como la invención de instrumentos de medición, fórmulas y modelos matemáticos que describen el proceso hidrológico.

En la parte final del texto se resalta el desarrollo de la hidrología en el Perú, tocando aspectos de manejo y legislación del agua, así como las instituciones responsables sobre la administración del agua e instituciones académicas de educación superior donde se imparten materias para la formación profesional en la hidrología; culmina con una descripción de la importancia del uso de satélites y los vehículos aéreos no tripulados (VANT) también conocidos como DRONES en hidrología, y la existencia de diferentes tipos de modelos matemáticos para estimar las variables hidrológicas.

Prólogo

Me complace y es motivo de júbilo, como miembro de esta comunidad universitaria basadrina, prologar el presente libro, *La Hidrología en el tiempo*, producto de una laboriosa investigación realizada por Edwin Martín Pino Vargas y que acercará a estos saberes a un gran segmento de la población estudiantil de la Ingeniería relacionado a los recursos hídricos como son las especialidades de ingeniería civil, agronómica, minas, geológica, ambiental, metalurgia...; así también, a quien desee, de manera particular, conocer mejor este tema. Entre las muchas razones que justifican la importancia de esta publicación, quisiera destacar dos: Primero, contribuir a la difusión de un tema tan significativo para Tacna y el Perú, propiciando el conocimiento histórico de la hidrología; segundo, ofertar al profesorado un instrumento para el ejercicio docente. Conocí bien a Edwin hace tres años y medio, aproximadamente, cuando supe que al igual que yo, era egresado de pre y posgrado de nuestra muy reconocida Universidad Nacional Agraria La Molina; y en mi ejercicio de Vicerrector de Investigación le propuse que asumiera la dirección del recién formado Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, pedido que aceptó gustoso. Aunque ya sabía de sus habilidades académicas, luego de muchas conversaciones me enteré que además de Ingeniero Agrícola era Ingeniero Civil y también dictaba clases en otra universidad. Entonces pude comprobar que se trataba de un profesional con excelente perfil académico y con inspiración científica; asimismo, entendí que teníamos algo en común: el mismo impulso por trabajar de la mejor manera en beneficio de nuestra UNJBG y de los estudiantes.

En la presente publicación, el lector podrá comprender que a través de toda su historia, la humanidad ha ido modificando la naturaleza, en su intento de utilizar el agua según las necesidades de la población. Desde la edad de piedra hasta la actualidad, los humanos han pasado del garrote y el fuego a la energía nuclear, y en el caso del agua, desde beber de los arroyos hasta el conocimiento actual de la Hidrología isotópica, para estudiar el ciclo hidrológico y los acuíferos del Perú y del mundo. Por otro lado, el lenguaje es claro, didáctico y sencillo; lo que facilita la lectura de cualquier persona, incluso sin formación técnica en la materia, abordando la evolución de conceptos valiosos en cuanto a la generación del agua y la producción de esta en la cantidad y calidad que la población del siglo XXI requiere.

No debemos olvidar que en nuestra región existe poca agua y su consumo se incrementa año tras año, sumándose a esta problemática la mala calidad del servicio que se nos brinda. Por ello, es necesario conocer mejor este recurso natural y fomentar su uso racional e imprescindible ahorro, distribuyendo su requerimiento

en el siguiente orden: consumo humano, la agricultura, la industria y la minería; es lamentablemente que actualmente las prioridades sean otras y se esté incrementando en ellas el grado de contaminación.

Deseo terminar este prólogo felicitando al autor por su esfuerzo, dedicación y excelente trabajo; e invitándolos a que disfruten plenamente de la lectura.

Ph.D. Héctor Rodríguez Papuico.

1. INTRODUCCIÓN



1.1. Definición de Hidrología

1.1.1 En la antigüedad

El concepto de ciclo hidrológico que hoy día nos parece tan obvio no fue, sin embargo, comprendido en la antigüedad, según atestiguan sus escritos (Figura 1.1). Desde los más remotos tiempos de la historia hasta los tiempos casi recientes (siglo XVIII), el origen del agua de los manantiales que alimenta a los ríos ha constituido un enigmático problema, siendo objeto de numerosas especulaciones y controversias (Martínez, 1972). Hasta finales del siglo XVII fue dogmáticamente aceptada la idea de que el agua descargada por los manantiales y la que drenan los cauces de los ríos no podían proceder de las precipitaciones atmosféricas; en primer lugar, debido a que las consideraron cuantitativamente insuficientes y, en segundo lugar, porque siempre se tuvo el concepto de que la superficie de la tierra era demasiado impermeable como para permitir una infiltración y una percolación masivas, profundas, de las aguas de lluvia y demás aguas meteóricas. Admitidos estos dos postulados erróneos, como resultó a lo largo de tantos siglos, los filósofos de las edades Antigua, Media y Moderna debieron recurrir a su ingenio e imaginación para explicar el misterioso origen de las aguas subterráneas.

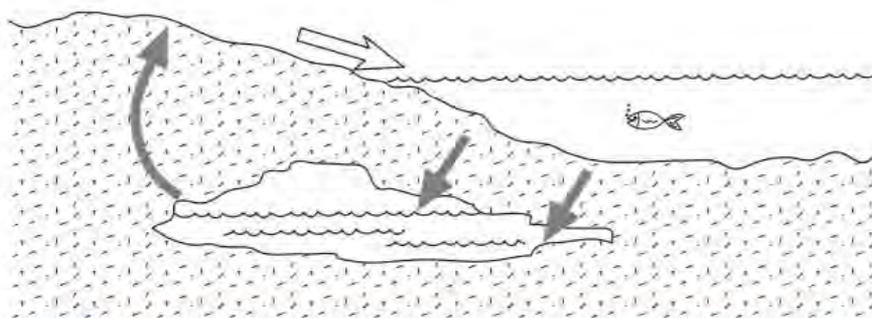


Figura 1.1. Conceptualización errónea del ciclo hidrológico (Sánchez, 2017)

1.1.2 *En la actualidad*

Existen varias definiciones de la hidrología que han sido expuestas a lo largo del tiempo. Según Meinzer (1923):

La hidrología es la ciencia que se relaciona con el agua de la tierra. El agua de la tierra se puede dividir en tres partes, la que se encuentra en la atmósfera, la que se deposita en la superficie terrestre y la que se encuentra debajo de la superficie. (p.2)

De igual forma, redefine a la hidrología como la ciencia interesada en la existencia del agua en la Tierra, sus reacciones físicas y químicas con el resto de esta y su relación con la vida misma.

"Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos" (National Research Council [NRC], 1963, p.1). Esta definición es considerada por muchos autores como la más completa (Aparicio, 1999).

En concordancia con dicha conceptualización, World Meteorological Organization [WMO] (2012) sostiene lo siguiente: Es la ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, y sus reacciones con el entorno, incluida su relación con los seres vivos (p.172).

1.2. **Facetas y Tipos de Hidrología**

Los tipos de hidrología se definen en base a las siguientes facetas: clasificación general, escala temporal, regiones climáticas, regiones ecológicas, regiones geomórficas, metodologías, tópicos y campos relacionados (Ponce, 1993).

1.2.1. *Clasificación General*

1. Hidrología de aguas superficiales

Describe la relación entre lluvia y la escorrentía superficial; siendo sumamente importante para los diversos usos del agua como el doméstico, la agricultura, el control de inundaciones, la

generación de energía eléctrica y el drenaje rural y urbano. Asimismo, establece la dinámica del movimiento del agua en sistemas superficiales (ríos, canales, corrientes, lagos...).

2. Hidrología de aguas subterráneas

Es una rama de la hidrología que se ocupa de las diferentes formas y estados del agua bajo la superficie terrestre. Sus principios básicos están establecidos desde el punto de vista científico y aplicado. Se interesa en relacionar las interacciones del agua con el medio, buscando dependencia no solo del medio sino, además, de las propiedades del fluido. Los medios ampliamente desarrollados han sido los porosos; en la actualidad se estudia los fracturados, kársticos u otros.

3. Hidrología de la zona vadosa

Se refiere al estudio del agua en la zona no saturada, que contiene fase líquida, sólida y gaseosa; incluye también a la franja capilar.

1.2.2. Escala Temporal

4. Hidrología de avenidas

Estudia la elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de este. Durante la crecida, el caudal de un curso de agua aumenta en tales proporciones que el lecho del río puede resultar insuficiente para conducirlo; por tanto, el agua lo desborda e invade el lecho mayor, también llamado llanura aluvial.

5. Hidrología de sequías

Se refiere a la ocurrencia de disponibilidad de agua por debajo del promedio natural de manera sostenida y a escala regional. Están generalmente asociadas a periodos continuos de escasas precipitaciones, baja humedad del suelo o disponibilidad de agua.

6. Hidrología de rendimiento de cuencas

Siendo la cuenca aquella superficie de territorio drenado por un único sistema natural con una salida exclusiva hacia algún lago o hacia el mar, el rendimiento hace referencia a la cantidad de agua que drena esta cuenca por unidad de superficie en el tiempo.

7. Hidrología de flujo de base

Su estudio se centra en los caudales que se observan en un curso de agua al final de un período de estiaje. Constituyen este caudal, los aportes de las aguas subterráneas a la red de drenaje natural.

8. Hidrología de flujos pequeños

Se refiere a la hidrología en flujos pequeños que se dan en cuencas también pequeñas, hasta de 250 km² (Aparicio, 1999); las cuales constituyen un alto porcentaje y son utilizadas en proyectos de suministro de agua para riego, acueductos, alcantarillados, generación hidroeléctrica o navegación, o en sistemas de control de inundaciones.

1.2.3. Regiones Climáticas

9. Hidrología de zonas áridas

Aquella donde la precipitación es insuficiente y en que los carbonatos solubles permanecen, acumulándose muchas veces debido a la evaporación, tras lo cual se generan "suelos áridos".

10. Hidrología tropical

Estudia los efectos que el bosque y su vegetación asociada ejercen sobre el ciclo hidrológico, los procesos erosivos y la calidad de las aguas.

11. Hidrología nórdica

Referida al estudio del agua en cuencas de territorio inhabitable, formado tanto por capas de hielo como por icebergs.

12. Hidrología polar

Trata sobre el estudio del agua en los océanos situados en las regiones polares y que son diferentes a los demás océanos de la Tierra. Por lo general hay hielo marino en su superficie, especialmente durante los meses de invierno.

1.2.4. Regiones Ecológicas

13. Hidrología de bosques

Estudia el movimiento del agua a través del bosque, teniendo en cuenta los procesos hidrológicos en zonas boscosas que se caracterizan por (1) el área foliar por encima del suelo, formando

un cierto número de capas o estratos; (2) la acumulación de la hojarasca o "litter" sobre la tierra, lo cual constituye el denominado "suelo forestal"; y (3) el suelo que se forma por debajo con raíces vivas y muertas, confiriendo al terreno condiciones apropiadas de permeabilidad.

14. Hidrología de praderas

Dedicada a estudiar el agua en medios denominados praderas, cuyo elemento principal se debe al bioma de flora, propio de zonas semiáridas en las regiones templadas con predominio de hierbas y de matorrales.

15. Hidrología de tierras silvestres

Estudio del agua en medio de tierras salvajes y sus particularidades, como por ejemplo: El Sáhara, tundras del norte de Rusia, la cuenca del Amazonas y el interior de Australia.

16. Hidrología agrícola

Se centra en el estudio de los componentes del balance hídrico en los suelos y en el manejo que se hace del agua, especialmente a través del riego y del drenaje subterráneo.

17. Hidrología urbana

Su estudio abarca aspectos relacionados con el ciclo hidrológico en áreas urbanas e industriales. Incluye todas las corrientes de agua naturales y se toma en consideración además las aguas pluviales, las aguas subterráneas, los ríos y los lagos. Asimismo, incluye la infraestructura y los sistemas de abastecimiento de agua y de saneamiento en una ciudad.

18. Hidrología rural

La hidrología rural, orientada a cuencas rurales, es aquella donde se tiene una mínima o nula concentración de población. Zonas que, si bien no cuentan con calles pavimentadas, drenajes, ni demasiadas azoteas que capten el agua, sí poseen, en cambio, una modificación de su estructura natural o primaria. La vegetación se ha modificado; la composición del suelo es diferente; existen cambios en los cauces originales, de modo que estas alteraciones provocan variantes de los escurrimientos finales.

19. Hidrología regional

Orientada al estudio hidrológico del territorio que en un determinado aspecto constituye una unidad homogénea por circunstancias históricas, políticas, geográficas, climáticas, culturales, lingüísticas o de otro tipo.

1.2.5. Regiones Geomórficas

20. Hidrología de cuencas hidrográficas

Se ocupa de realizar un estudio del agua en una cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje; esto es un territorio que libera parte del agua a través de un sistema de drenaje natural, delimitadas por una línea de cumbres, también llamadas divisorias de agua, límite de cuenca o parte aguas.

21. Hidrología de zonas nevadas

La hidrología de zonas nevadas está referida, básicamente, a la precipitación sólida en forma de copos de nieve que se presentan sobre los 3600 msnm. Se encuentra asociada a la escorrentía de la lluvia y de la fusión de la nieve que fluye naturalmente o se deriva a cursos que también interceptan la escorrentía de las laderas por donde discurren.

22. Hidrología glaciar

Estudia los efectos del retroceso de la superficie glaciar; es probable advertir que, en cuencas con glaciares pequeños, dicho retroceso resulta más severo.

23. Hidrología de zonas montañosas

Estudia el ciclo del agua en las montañas, el cual se inicia con la lluvia o nieve; de allí la importancia de analizar los siguientes indicadores: cuánto, cuándo y cómo se dan estas precipitaciones atmosféricas. Además, es necesario conocer sobre qué planta o suelo cae dicha lluvia o nieve, qué pedregosidad hay en la superficie, cuál es la pendiente del terreno; porque del tipo de respuesta, se puede estimar la fracción del agua que se infiltra, queda retenida en superficie o escurre y, por tanto, cuánta se almacena en el suelo donde puede ser usada por la vegetación. Todo esto delimita un clima mediterráneo, cuya principal característica es el desfase entre la precipitación y las posibilidades de la vegetación para evapotranspirar.

24. Hidrología de piemonte

Estudia la hidrología referida a los pies de las montañas, es decir, a la parte baja de estas, donde se analizan todos los procesos hidrológicos que allí ocurren.

25. Hidrología de zonas kársticas

Es la parte de la hidrología que trata de flujos en zonas de calizas y/o dolomías fisuradas, de topografía generalmente llana.

26. Hidrología de rocas

Está referida al movimiento del agua en una serie de estratos o formaciones de materiales rocosos. Por su naturaleza, dichos estratos son porosos y permiten el ingreso de agua proveniente de precipitaciones o deshielos al interior de la corteza terrestre.

27. Hidrología de conos aluviales

Concerniente al estudio del agua en conos aluviales que ocurren al pie de montañas y son testigos de las avenidas de ríos, los cuales llevan sedimentos que se depositan creando un cuerpo de tierra en forma de cono.

28. Hidrología de llanuras inundables

La hidrología de llanuras de inundación estudia los efectos del agua en áreas de superficie adyacente a ríos o riachuelos, sujeta a inundaciones recurrentes. Debido a su naturaleza siempre cambiante, las llanuras de inundación y otras áreas inundables deben ser examinadas para precisar la manera en que pueden afectar al desarrollo o ser afectadas por él.

29. Hidrología de corrientes de agua

Es la hidrología que estudia los mecanismos de recolección y la distribución del agua en las corrientes que surcan el territorio.

30. Hidrología de lagos

Este tipo de hidrología está orientado a establecer las entradas y salidas del balance hidrológico.

31. Hidrología de humedales

Busca determinar la capacidad de los humedales con el cambio en el régimen hídrico; el cual puede alterar drásticamente sus

características ecológicas para proporcionar bienes y servicios a los ecosistemas y a la sociedad.

32. Hidrología de zonas de suelos orgánicos

Estudia el conocimiento de la física de suelos orgánicos como herramienta para la evaluación de procesos hidrológicos asociados a la caracterización y prevención de problemas ambientales.

33. Hidrología de costas y deltas

Orientada al estudio de la interacción entre los ríos y la generación de los deltas y zonas costeras, formados en la desembocadura de los ríos debido a la deposición de sedimentos fluviales.

34. Hidrología de estuarios

Busca determinar condiciones hidrológicas como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, densidad y estabilidad de las aguas, así como procesos de circulación, mezcla y estancamiento.

35. Hidrología de isla

Estudia los fundamentos geológicos a fin de comprender el funcionamiento del agua subterránea en una isla volcánica; discute los diferentes modelos hidrológicos existentes para las islas, lo que ayuda a discernir las singularidades de la hidrología superficial en las islas volcánicas y sus métodos de aprovechamiento. Asimismo, busca descubrir el efecto de las precipitaciones de niebla en el ciclo hidrológico de las islas y, de manera especial, en las aguas subterráneas.

36. Hidrología de endorreica

Se encarga del estudio de la hidrología en cuencas endorreicas, las cuales son sistemas donde el agua no tiene salida fluvial. Cualquier lluvia u otra forma de precipitación que caiga en una cuenca endorreica estacionará el agua allí, la que únicamente podrá abandonar el sistema por medio de infiltración o de evaporación; hecho que contribuye a la concentración de sales.

37. Hidrología global

Orientada al estudio de la hidrología y su efecto directo en la vida y actividades de un gran número de personas.

38. Hidrología de hoyos en las praderas

Estudio de los procesos hidrológicos con fines de la producción de pastos naturales y artificiales en las praderas.

1.2.6. Metodologías

39. Hidrología determinística

Se refiere a la aplicación de métodos de análisis de los procesos hidrológicos, utilizando una aproximación determinística para analizar las respuestas de los sistemas hidrológicos, en función de diversos parámetros.

40. Hidrología estocástica

Estudia la cuantificación del proceso hidrológico mediante variables que tienen un comportamiento espacial y temporal, que puede ser analizado y sintetizado usando análisis de series temporales y procesos estocásticos, en los cuales estas magnitudes varían con el tiempo.

41. Hidrología estadística

Está orientada a aplicar en la hidrología los principios fundamentales de la probabilidad y de la estadística, así como implementar herramientas estadísticas en la solución de problemas hidrológicos.

42. Hidrología paramétrica

Consiste en el desarrollo de relaciones entre las diferentes variables físicas que influyen sobre los procesos hidrológicos y el uso de tales relaciones con el fin de reconstituir o predecir series hidrológicas. En los métodos que utiliza la hidrología paramétrica se puede identificar los de análisis de regresión, la síntesis parcial de sistemas con análisis lineal (métodos del hidrograma unitario), la síntesis general de sistemas (modelos matemáticos de simulación hidrológica) y el análisis no lineal de sistemas.

43. Hidrología conceptual

Se ocupa del estudio de las representaciones conceptuales simplificadas de los procesos físicos que usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos

complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.

44. Hidrología analítica

Está referida al empleo de métodos de análisis de los procesos hidrológicos, utilizando una aproximación determinística para analizar las respuestas de los sistemas hidrológicos, en función de diversos parámetros.

45. Hidrología numérica

Estudia la solución numérica de las ecuaciones, sean algebraicas o diferenciales, que representan los procesos físicos de la hidrología.

46. Hidrología teórica

Es la rama de la hidrología que se encarga de verificar la demostrabilidad de las teorías generadas en el campo de la hidrología. Por ejemplo, propone conceptos simplificados de los procesos físicos en la formación del flujo.

47. Hidrología aplicada

Atiende los principios de la ciencia hidrológica y su aplicación a la solución de problemas hidráulicos e hidrológicos de los recursos hídricos, incluyendo cuestiones ambientales relacionadas con el agua.

48. Hidrología experimental

Centra sus investigaciones en diferentes escalas de espacio y de tiempo: desde una parcela experimental hasta una subcuenca; así también, desde un evento de lluvia en el periodo de una hora hasta el balance hidroclimatológico multianual.

49. Hidrología científica

Se encamina a desarrollar nuevos conocimientos científicos en el campo de la hidrología; los cuales permitan, a su vez, la elaboración de tecnologías nuevas para hacer frente a la demanda actual y futura de recursos hidrológicos.

50. Hidrología para ingenieros

Orientada al estudio de los elementos básicos del ciclo hidrológico; para ello, describe los principios científicos que

gobiernan los fenómenos hidrológicos y las técnicas más utilizadas en la práctica, respecto a la cuantificación de tales fenómenos aplicados a la solución de problemas en ingeniería.

51. Hidrología computacional

Se hace cargo del estudio de los procesos hidrológicos desde un punto de vista computacional, plasmado a su vez en el desarrollo de aplicaciones informáticas de análisis hidrológico; es decir, representa una herramienta básica para la creación de nuevas aplicaciones en el estudio de otros métodos mediante los cuales abordar el amplio campo de la hidrología. En definitiva, es una forma distinta de aproximarse a la comprensión y entendimiento de los principios que rigen las dinámicas del agua y el medio, en términos genéricos.

52. Hidrología sintética

Basada en la generación de series sintéticas de los procesos hidrológicos, dichas series deben dar idea de las variaciones muestrales del proceso, en la espera de que estas guarden algún grado de coincidencia con las series reales que podrán ocurrir a futuro.

53. Hidrología cinemática

Estudia el movimiento del agua a través de las ecuaciones del flujo no permanente (ecuaciones de Saint-Venant). Existe una simplificación de dichas ecuaciones, considerando únicamente las fuerzas de gravedad y de fricción como relevantes en la descripción del movimiento. Esta simplificación se conoce como aproximación de la onda cinemática.

54. Hidrología dinámica

Concerniente a la exploración de los depósitos y procesos del ciclo hidrológico, la comprensión de los procesos de evaporación y condensación del agua en la atmósfera, el uso de métodos y algunas soluciones para describir la transformación de lluvia en escorrentía, así como de recarga y descarga de acuíferos freáticos y el análisis estocástico de la humedad del suelo.

55. Hidrología física

Se refiere al estudio de aspectos fundamentales del agua, su presencia en la naturaleza, zonas de recarga y descarga, las propiedades de los materiales que influyen en su ocurrencia y

almacenamiento; así como las ecuaciones que gobiernan su movimiento y los métodos empleados para su investigación, utilización y conservación.

56. Hidrología espacial

Cuenta con una metodología específica para cuantificar los cambios actuales en el ciclo del agua, tanto como sus efectos. Se debe tener presente el desarrollo de diversos modelos predictivos para mejorar la capacidad de predicción. La información proporcionada por los satélites es requerida permanentemente, con el objetivo de controlar y cuantificar los diferentes elementos del ciclo del agua.

57. Hidrología de sistemas

Es un modo de enfoque interdisciplinario que permite estudiar y comprender la realidad, con el propósito de implementar u optimizar sistemas hidrológicos complejos. Puede también verse como la aplicación tecnológica de la teoría de sistemas a los esfuerzos de la ingeniería hidrológica, adoptando en todo este trabajo el paradigma sistémico.

58. Hidrología de campo

La hidrología de campo hace referencia al recorrido y reconocimiento físico de la cuenca, donde se evalúa sus características geomorfológicas e hidrológicas. En las geomorfológicas se observa in situ la forma de la cuenca, las variaciones altitudinales, se analiza las características de los ríos, entre otras; en tanto que en las hidrológicas se mide los caudales de los ríos, se anota las huellas históricas de máximas y mínimas de los ríos. Durante el trabajo de campo, también se realiza entrevistas a los pobladores de los lugares, a quienes se les solicita información referente a aspectos hidrológicos y geomorfológicos, evaluando las características históricas de los ríos (caudales máximos y mínimos). Asimismo, se efectúa evaluaciones de algunos acontecimientos extra naturales, como el caso del fenómeno de El Niño, entre otros.

59. Hidrología operacional

Está orientada a desarrollar actividades operacionales, tales como los organismos de Cuenca, las direcciones locales y centros hidrometeorológicos regionales.

60. Hidrología en línea

Consiste en el uso e intercambio de aplicaciones disponibles en la web para realizar cálculos en ingeniería hidrológica.

61. Hidrología de informática suave

Está basada en sistemas informáticos suaves, formando parte de varios sistemas hidrológicos mayores o contenedores simultáneos; hecho que establece objetivos poco claros o carencia total de ellos.

1.2.7. Tópicos

62. Hidrología ambiental

Considera las fluctuaciones climáticas y las actividades humanas, a diferentes escalas temporales y espaciales, tanto como su influencia en las características de los procesos hidrológicos y geomorfológicos de la Tierra.

63. Hidrología de calidad del agua

Se refiere al estudio del agua estrechamente ligado a su calidad en las diferentes fases del ciclo hidrológico.

64. Hidrología de contaminantes

Estudio del agua que nos proporciona, en distintas formas, la naturaleza y el cumplimiento de los requisitos para ser consumida de manera directa por el ser humano, analizando cualquier posible contaminación.

65. Hidrología de drenaje

Se ocupa de los procesos hidrológicos en relación a los sistemas de drenaje que permiten evacuar los flujos superficiales o subterráneos.

66. Hidrología de minas

Orientado a desarrollar suministros de agua en entornos hidrológicamente complejos y climáticamente dificultosos.

67. Hidrología de embalses

Estudia la regulación fluvial a través de embalses y derivaciones que han sido motivados por diversos objetivos, como son el control de avenidas, el abastecimiento de agua y la producción de energía eléctrica.

68. Hidrología de caminos y puentes

Se trata del estudio de temas relacionados a las metodologías que permiten estimar los caudales de diseño de las obras; los cuales constituyen el sistema de drenaje proyectado de una carretera (drenaje superficial y subterráneo), partiendo del análisis de la información hidrológica y meteorológica disponible en el área de estudio.

69. Hidrología de navegación

Los estudios de hidrología en los proyectos de navegación marítima consisten en el análisis del estado del tiempo en mar profundo, en la plataforma continental y en los litorales. El estado del tiempo es una variable hidrológica que relaciona temperatura, humedad, presión atmosférica y vientos; además, es responsable de la presencia de olas en la superficie del mar. En los proyectos de navegación fluvial, la hidrología estudia los regímenes de caudales medios y extremos en los tramos navegables, las relaciones caudal-profundidad, así también los volúmenes de sedimentos que se mueven como carga de fondo y en suspensión.

70. Hidrología nuclear

La hidrología nuclear isotópica permite conocer el comportamiento del agua y ayuda a establecer las bases para el manejo racional de este recurso. Los principales usos de los radioisótopos son la datación, que permite conocer la edad y el tiempo de tránsito de las aguas; y como trazadores para determinar el origen, la velocidad de flujo, las fuentes de contaminación y los procesos de degradación.

71. Hidrología militar

Orientada al análisis de los procesos hidrológicos y su uso en la generación de tácticas militares, por ejemplo, las tácticas estratégicas que se plantean en conflictos bélicos.

72. Hidrología económica

Estudia la valoración económica del agua que ejerce un papel preponderante en la gestión de la demanda y en una mejor distribución entre sus varios usos.

73. Hidrología socioeconómica

Interacción entre la hidrología, la sociedad y la economía con el

objetivo de generar las bases para la planificación y gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca. A fin de lograr esto, hace énfasis en el uso del agua promoviendo así su manejo eficiente, racional y equitativo.

74. Hidrología histórica

Generalmente estudia los períodos de desarrollo de la hidrología. Algunos autores consideran los siguientes: especulativo, observación, medida, experimentación, modernización, empirismo, racionalización y teorización.

75. Hidrología arqueológica

Busca la correlación entre la hidrología y los elementos arqueológicos; por ejemplo, entre la hidrología del subsuelo, las líneas de corriente profunda y las estructuras arqueológicas.

76. Hidrología médica

Estudia las aguas mineromedicinales, marinas y potables ordinarias. En particular, se ocupa de la acción y efecto de estos recursos sobre el organismo humano, en estado de salud y durante las enfermedades.

77. Hidrología política

La hidrología política se orienta a establecer lineamientos de gobierno, así como la organización de las sociedades humanas, especialmente en temas referidos a la distribución, manejo y conservación del agua.

78. Hidrología forense

La hidrología forense es parte de las disciplinas ambientales. Si bien es cierto, su nombre parece circunscribirse a la definición del componente agua, esta no tiene por qué limitarse a los temas de contaminación; por lo que también puede estar referida a temas como inundaciones, drenaje, escurrimiento, recursos hídricos, bombeo, puentes o cualquier estructura hidráulica. Hay ocasiones en que la hidrología forense sirve para evitar males mayores; mientras que en otros casos sirve para racionalizar el uso del recurso hídrico y su distribución.

79. Ecohidrología

Estudio integrado de los patrones y procesos hidrológicos, y de la

dinámica de la biota en diversas escalas espaciales y temporales. Asimismo, puede referirse a las interacciones planta-agua, tanto como a los procesos hidrológicos relacionados al crecimiento de la vegetación.

80. Geohidrología

La geohidrología se encarga de estudiar el comportamiento del agua en un ambiente geológico, según las leyes de la hidráulica. Comprende la hidráulica de pozos, es decir, las perforaciones que se hacen para obtener agua con diferentes fines y el control de su conducta en el entorno, según el tipo de material perforado.

81. Paleohidrología

Representa la ciencia que estudia los sistemas hidrológicos y la manera como estos se presentaban en períodos anteriores de la historia de la Tierra. Se afirma, además, que los cambios en las condiciones hidrológicas pasadas pueden deducirse a partir de las evidencias de alteración, deposición y erosión registradas en las rocas de estos períodos. Asimismo, esta ciencia se encarga del estudio de los cambios en los conjuntos de flora y fauna, a través del tiempo geológico; los cuales han sido enormemente influenciados por el cambio hidrológico.

82. Hidrología transfronteriza

Estudia las aguas superficiales y subterráneas que puedan estar discurriendo por la frontera entre dos o más países; son aguas internacionales, por tanto, ese sistema y sus aguas forman una cuenca internacional o son parte de ella.

83. Hidrología de macroescala

Analiza fenómenos que duran entre algunos días o varios meses, y tienen una longitud media aproximada comprendida entre 2000 y 10000 km. En esta escala se incluyen la mayor parte de anticiclones, ondas frontales y depresiones y es usualmente la escala en que se realizan las predicciones meteorológicas.

84. Hidrología de microescala

Considera fenómenos con una duración entre algunos minutos y horas, los cuales tienen una longitud media inferior a 2 km. Se utiliza esencialmente en el caso de difusión de contaminantes, lluvias en zonas reducidas, tormentas locales y turbulencia.

85. Hidrología de mesoescala

Centra su interés en los fenómenos que pueden durar entre horas y días, abarcando de 2 a 2000 km. Se incluyen aquí algunos frentes y depresiones, así como las grandes tormentas. Es muy importante en lugares de orografía accidentada.

86. Hidrología de disturbio de incendios

Estudia los factores de disturbio que ocasionan daños a los bosques y la hidrología forestal de forma temporal o permanente, como son la tala de árboles, caminos forestales, incendios forestales, el pastoreo, la fertilización, aplicación de herbicidas y pesticidas, actividades de recreación y minería. Los bosques en su estado natural funcionan como reguladores del ciclo hidrológico. El bosque intercepta la precipitación tanto en el follaje como en el suelo forestal, facilitando altas tasas de infiltración y recarga de mantos freáticos; además, produce un escurrimiento superficial uniforme.

87. Hidrología de desastres

Se encarga de los estudios hidrológicos relacionados a la vulnerabilidad y ocurrencia de desastres naturales asociados a los cambios ambientales globales. Las actividades desarrolladas comprenden observaciones in situ y remotas, el modelado de los diversos componentes del ciclo hidrológico y de los procesos, interacciones y patrones que condicionan la respuesta hidrológica de las cuencas, así también el análisis de vulnerabilidad de la población a la degradación ambiental y a eventos hidroclimáticos extremos.

1.2.8. Campos Relacionados

88. Hidrogeología

Parte de la geología que estudia el ciclo de las aguas superficiales y subterráneas; asimismo se ocupa de su prospección, captación y protección.

89. Hidroecología

Rama de la ciencia ecológica que estudia las interacciones entre los procesos hidrológicos y los sistemas ecológicos a diferentes escalas espacio-temporales.

90. Hidrometeorología

La hidrometeorología es la ciencia que estudia el ciclo del agua en la naturaleza. Está vinculada estrechamente con la meteorología, la hidrología y la climatología; de allí que abarque el estudio de las fases atmosféricas (evaporación, condensación y precipitación) como terrestres (intercepción de la lluvia, infiltración y derramamiento superficial) del ciclo hidrológico y, en especial, de sus interrelaciones. Comprende la observación, el procesamiento y el análisis del comportamiento de los elementos hídricos; fundamentalmente las descargas de los ríos y los volúmenes almacenados en embalses naturales y artificiales, así como de los factores meteorológicos.

91. Hidroclimatología

Se constituye en un marco sistemático para analizar el modo en que la atmósfera ocasiona la variación espacio temporal de los elementos del ciclo hidrológico en escalas globales, regionales y locales. La hidroclimatología se definió cerca de 1967 como el estudio del clima sobre las aguas continentales; incluye la hidrometeorología y también los procesos de superficie y cercanos a esta como son la evaporación, la escorrentía, la intercepción de agua por la vegetación y la recarga de aguas subterráneas.

92. Ecohidroclimatología

Este concepto sienta las bases para describir las características de las comunidades vegetativas, utilizando la perspectiva interdisciplinaria. El tipo y la densidad de las comunidades vegetativas en todo el paisaje, están condicionados por los siguientes factores: Geología y geomorfología, precipitación, proximidad del agua subterránea, velocidad del drenaje superficial, temperatura media y variación estacional de temperatura.

93. Dendrohidrología

Utiliza anillos anuales datados para estudiar y fechar problemas hidrológicos, tales como el caudal de los ríos, los cambios de nivel de agua en lagos y embalses, y la historia de las inundaciones.

94. Dendroclimatología

Es la disciplina más desarrollada dentro de la dendrocronología;

su objetivo es estudiar y reconstruir el clima del pasado y del presente, a partir de secuencias de anillos de árboles.

95. Hidrosedimentología

Permite determinar con precisión los actuales flujos de agua de los ríos, describiendo su comportamiento según la época climática del año.

96. Hidroarqueología

Busca la relación entre la distribución del poblamiento de épocas antiguas y los condicionamientos geológicos e hidrológicos que impone el medio físico. A partir de ello, se debe exponer consideraciones sobre el grado de determinismo ambiental en la localización de los asentamientos.

97. Hidroquímica

Estudia la química de las aguas superficiales y subterráneas.

98. Hidrobiología

Es la parte de la biología que se ocupa del estudio de los ambientes acuáticos; los cuales, dependiendo de su grado de salinidad, se definen en dos grandes apartados: limnología y oceanografía.

99. Hidrogeografía

Corresponde al estudio del entorno físico natural abiótico y biótico sobre el que se desarrollan las diversas actividades antrópicas.

100. Hidroinformática

La hidroinformática está orientada al uso de soluciones tales como métodos numéricos de modelización y optimización, redes de sensores, sistemas de información e inteligencia artificial (análisis inteligente de datos, herramientas de ayuda a la decisión) a fin de resolver problemas de hidráulica, hidrología e ingeniería ambiental con el objetivo de obtener un mejor manejo de los sistemas basados en recursos hídricos.

101. Transporte de sedimentos

Corresponde al estudio del transporte de sedimentos por los ríos, siendo un proceso continuo en la naturaleza; prueba de esto es la

migración de los ríos, la formación y destrucción de bordos e islas, y los cambios de contorno en playas y costas. Estos procesos se originan con el inicio de movimiento de los sedimentos, la entrada en suspensión y el arrastre de fondo; lo que produce erosión, el transporte de sedimento, la deposición de partículas, su compactación y consolidación, por tanto, crea continuamente los paisajes y modifica la forma de los ríos, a través del tiempo. Su evolución se observa en períodos largos de tiempo.

102. Geomorfología fluvial

Es la rama especializada de la geomorfología que se encarga del estudio de los accidentes geográficos, formas y relieves ocasionados por la acción de los ríos sobre la superficie terrestre.

103. Geomorfología deltaica

Hace referencia al estudio de los deltas que se forman en la desembocadura de las cuencas vertientes fluviales; las cuales abastecen el delta con agua, sedimentos y elementos químicos que llegan a la zona costera de un mar o de un lago.

104. Potamología

La Potamología se interesa en el conocimiento científico de los ríos, integrando la aplicación de diferentes disciplinas relacionadas con su estudio y comportamiento morfológico.

105. Legislación de aguas

Regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a estas. Asimismo, se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable. Cabe destacar que se da bajo los siguientes principios fundamentales: Principio de valoración del agua y de gestión integrada del agua, Principio de prioridad en el acceso al agua, Principio de participación de la población y cultura del agua, Principio de seguridad jurídica, Principio de respeto de los usos del agua por las comunidades campesinas y comunidades nativas, Principio de sostenibilidad, Principio de descentralización de la gestión pública del agua y de autoridad única, Principio precautorio, Principio de eficiencia, Principio de gestión integrada participativa por cuenca hidrográfica, y, Principio de tutela jurídica.

106. Gestión de recursos hídricos

La gestión integrada de los recursos hídricos es un proceso que promueve, en el ámbito de la cuenca hidrográfica, el manejo y desarrollo coordinado del uso y aprovechamiento multisectorial del agua con los recursos naturales vinculados a esta. Dicha gestión debe lograr el desarrollo sostenible del país sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas.

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).

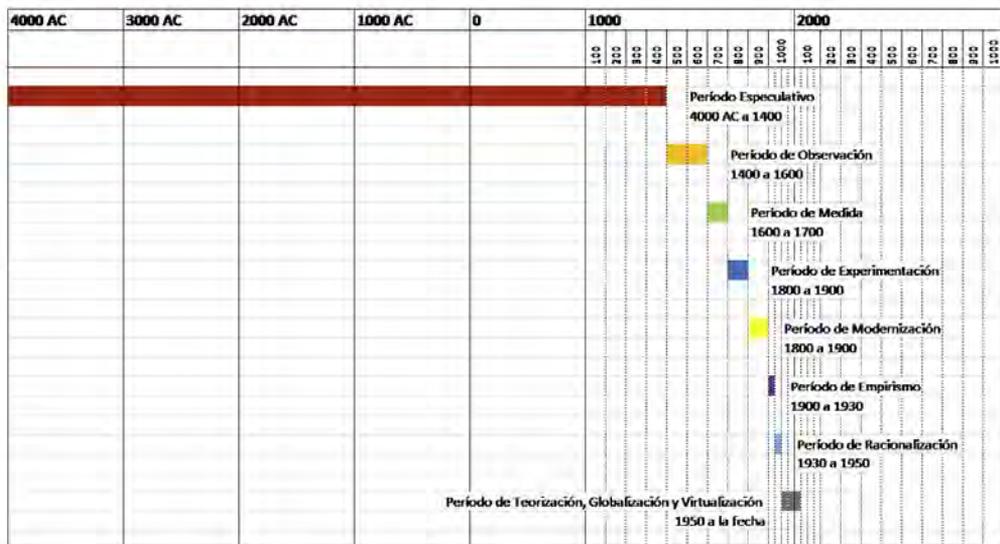


Figura 2.1. Períodos o etapas de desarrollo de la hidrología (Campos, 1992)

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 preincas (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.

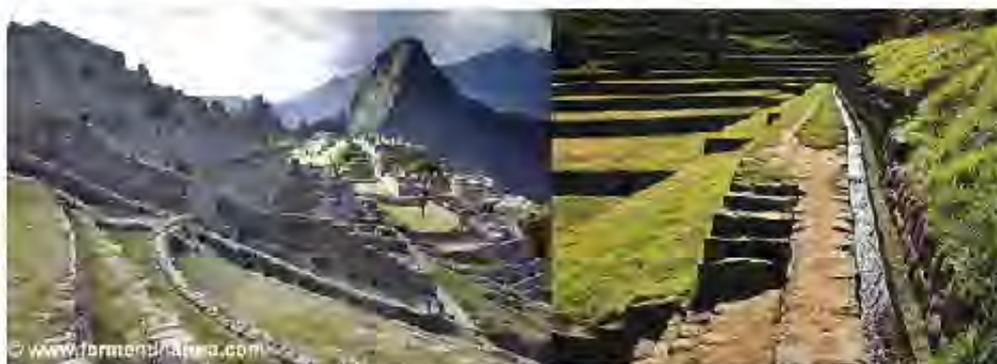


Figura 2.11. Canales de abastecimiento de agua, Ciudadela de Machu Picchu (Natura, 2013)

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.

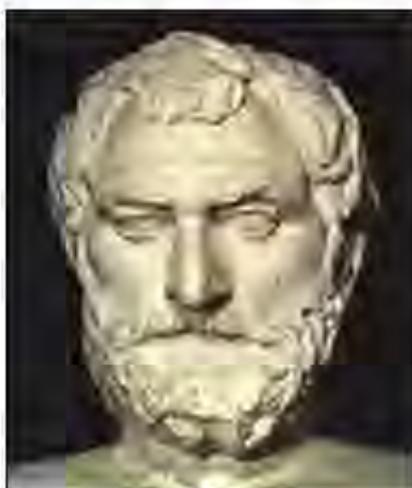


Figura 2.13. Tiroles de Mileto
(O'Grady, s. f.)

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, sienta 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.

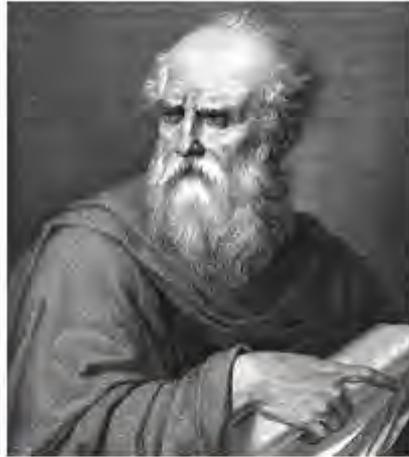


Figura 2.18. Marcus Vitruvius Pollio (Enciclopedia Biográfica en Línea, s. f.)

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).

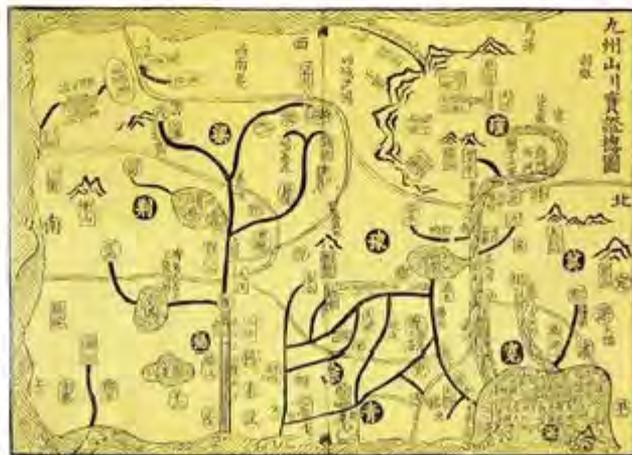


Figura 2.21. Sistema de Zhou, atribuido a Shun (Wu, 1982)

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

majestuosa obra titulada *Discours admirable de la Nature des Eaux et Fontaines* (Figura 2.25). Sus teorías acerca del origen del agua subterránea, que aparecen escritas en forma de un fascinante diálogo entre dos personajes: "Teoría" y "Práctica", han sido traducidas a varios idiomas.



DISCOURS ADMIRABLES, DE LA NATURE DES EAUX ET FONTAINES.

OU DISCOURS NATURELS & PRACTIQUES, DE LA NATURE, DES SONS & LIEUX, DES PERTEUSES, & DE LA MANIERE DE LES FAIRE.

AVEC NEUF TABLES AVANT LES DISCOURS.

PREMIERE PARTIE DE LA MANIERE, SUR LE SILENCE & LES EAUX, POUR CEUX QUI S'APPLIQUENT A L'AGRICULTURE.

DEUXIEME PARTIE DE LA MANIERE, SUR LE SILENCE & LES EAUX, POUR CEUX QUI S'APPLIQUENT A L'ART DE FAIRE LES PERTEUSES.

PAR BERNARD PALISSY, INGENIEUR DES ARTS, & DE LA MANIERE DE LES FAIRE.

A PRESANT, ET PREPARANT POUR LE ROY, EN LA VILLE DE PARIS, CHEZ MESSIEURS LES SEIGNEURS DE LA CHAMBRE DES COMPTES, EN LA COUR DU PALAIS NATIONAL, EN LA SALLE DES SEIGNEURS DE LA CHAMBRE.



A PARIS,

Chez Messieurs les Seigneurs de la Chambre des Comptes, au Palais National de Comptes.

1680.

AVEC PRIVILEGE DU ROY.

Figura 2.25. (a) Bernard Palissy. (b) Publicación en francés (Williams, 2007) (Palissy, 1580)

En la majestuosa obra de Palissy (1580) se presenta este diálogo:

La "Práctica" dice:

"Después de haber considerado seriamente durante mucho tiempo la causa del origen de los manantiales y el lugar de donde sus aguas proceden, he llegado, finalmente, a la firme convicción de que éstas proceden de las lluvias y no son engendradas por otra causa que ésta".

A lo que la "Teoría" contesta:

"Después de haber escuchado su opinión, yo también estoy plenamente convencida de que Ud. está completamente loca; Ud. me cree tan ignorante como para dar más crédito a aquello que me acaba de contar que a lo que nos contaron ya la mayoría de los filósofos, quienes nos dijeron que todas las aguas proceden del mar y a él retoman. No hay nadie, ni incluso los hombres más viejos, que duden de esta teoría y,

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.
Opus et Inventio. a. 1664. D.D. Blaeuw. Fecit. et. Pinxit.

Figura 2.26. Athanasius Kircher S.J. (Blaeuwaert, 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 (Ilustración, 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).

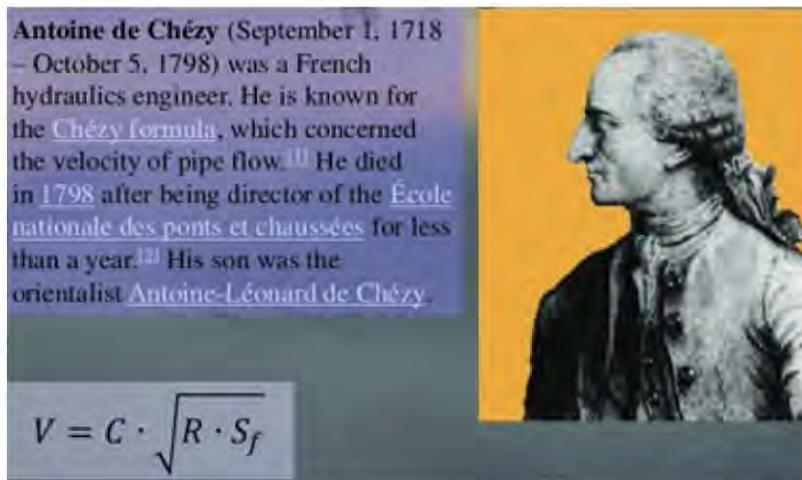


Figura 2.31. Antoine Chézy (Ponce, 2015)

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).

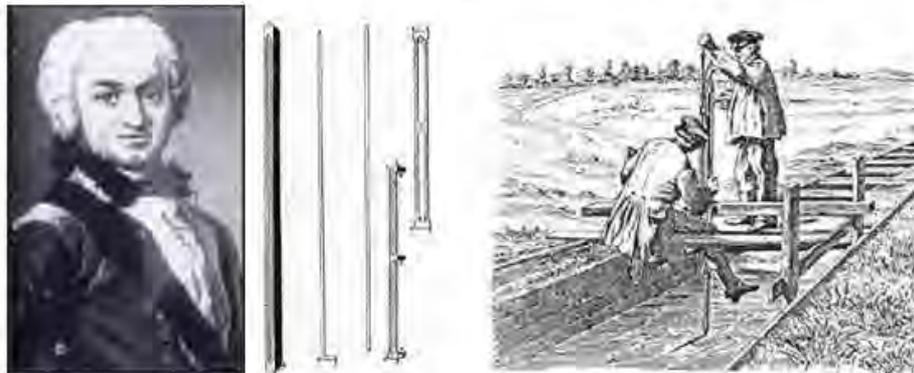


Figura 2.33. (a) Henri Pitot. (b) Tubos de Pitot. (c) Mediciones en campo (G. Brown, 2003)

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).

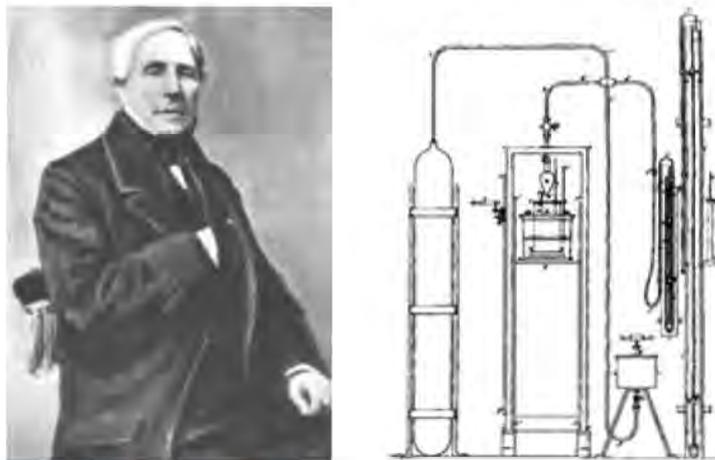


Figura 2.34. (a) Jean Poiseuille. (b) Elevación frontal aparato de Poiseuille (1846) (Sutera & Skalak, 1993)

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".

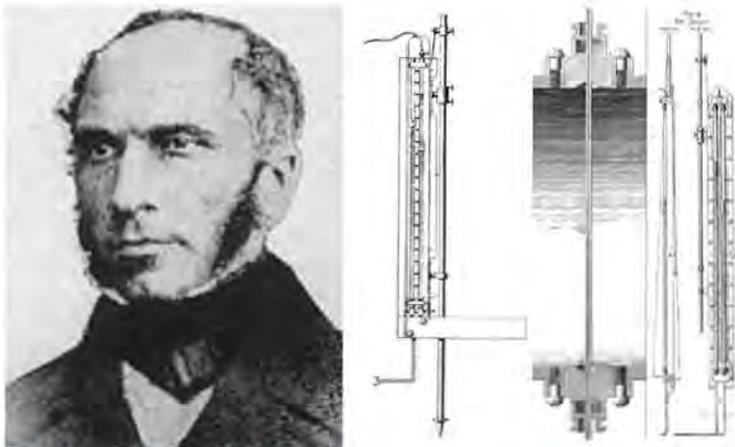


Figura 2.35. (a) Henry Darcy, (b) Tubo de Pitot mejorado: 1968, 1957, 1956 (Brown, 2003)

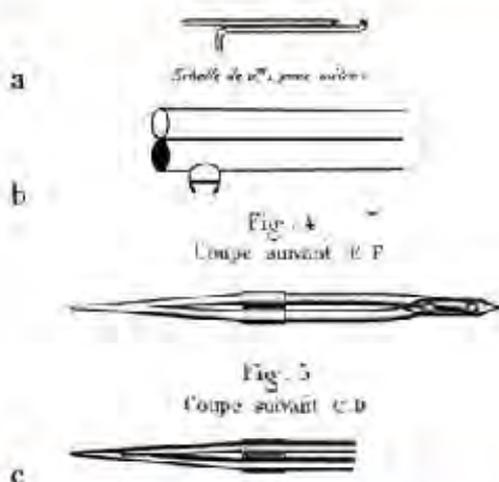


Figura 2.58. Boquillas diseñadas por Henry Darcy (a) 1856, (b) 1858, (c) 1855 (G. Brown, 2003)

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).

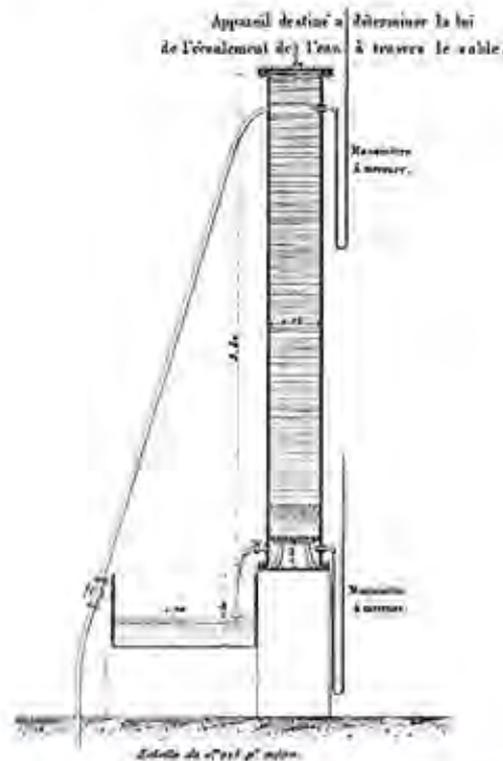


Figura 2.38. Columna de arena original de Henry Darcy (Darcy, 1856)

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 nominó *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).

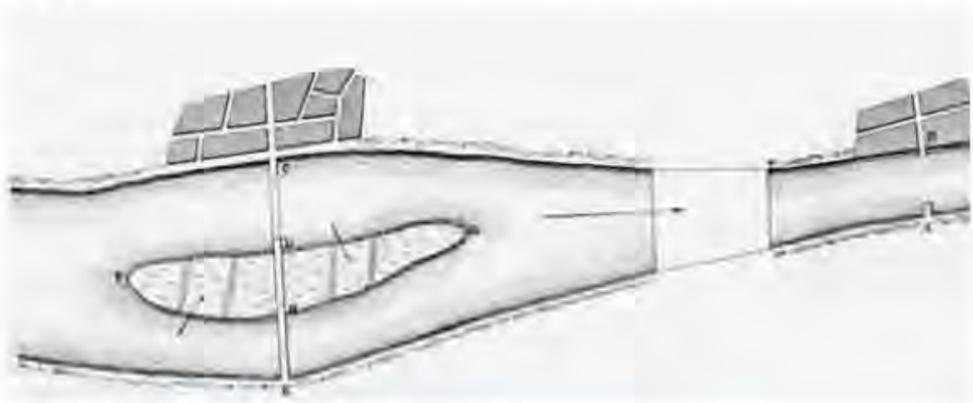


Figura 2.40. Flujo al contorno de una isla (Dupuit, 1863)

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

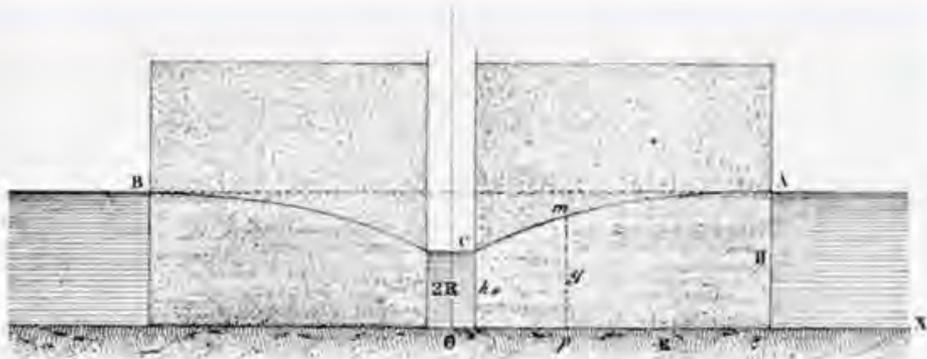


Figura 2.41. Solución Dupuit para flujo a un pozo (Dupuit, 1863)

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).

$$H_0 - H = \frac{Q}{2\pi T} L \frac{R}{L}$$

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).

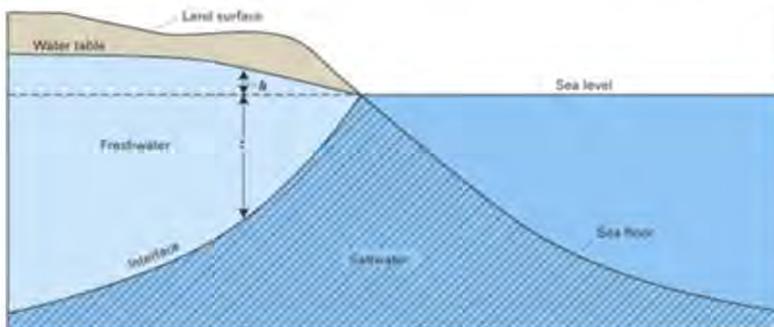


Figura 2.42. Relación Ghyben-Herzberg (Verruijt, 1968)

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

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 f y s : densidades del agua dulce y del agua salada, respectivamente. El agua dulce tiene una densidad de aproximadamente 1000 gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) a $20^\circ C$, mientras que la del agua de mar es de aproximadamente 1 025 g/cm^3 . 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 Mississippi, 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).

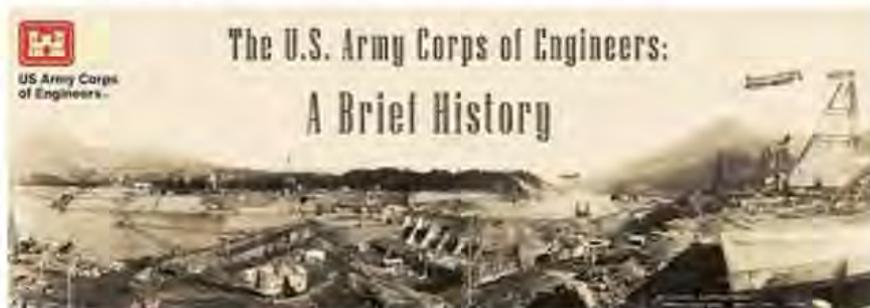


Figura 2.50. Página Web United States Army Corps of Engineers

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

70, el Servicio Geológico de los Estados Unidos lo considera como un código estándar para simulaciones de acuífero. Actualmente se ha desarrollado algunas interfaces gráficas para MODFLOW. (Figura 2.51).

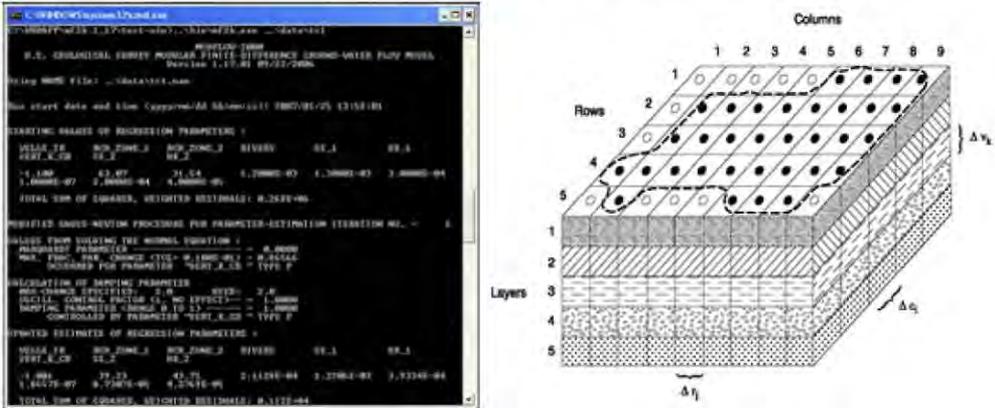


Figura 2.51. (a) Simulación MODFLOW en DOS. (b) Malla tridimensional

2.6.16. National Weather Service

El Servicio Meteorológico Nacional (NWS) es una agencia del Gobierno Federal de los Estados Unidos encargada de proporcionar predicciones meteorológicas, advertencias de condiciones climáticas peligrosas y otros productos relacionados con el clima para organizaciones y el público, con fines de protección, seguridad e información general. Es parte de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) del Departamento de Comercio, y tiene su sede en Silver Spring, Maryland, dentro del área metropolitana de Washington. La agencia era conocida como la Oficina Meteorológica de los Estados Unidos desde 1890, hasta que adoptó su nombre actual en 1970. El NWS realiza su tarea principal a través de una colección de centros nacionales y regionales, y 122 oficinas locales de pronóstico meteorológico (WFO). Como el NWS es una agencia del Gobierno Federal de los EE. UU., la mayoría de sus productos son del dominio público y están disponibles de forma gratuita (US Department of Commerce, s. f.).

En 1870, el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos se estableció mediante una resolución conjunta del Congreso firmada por el presidente Ulysses S. Grant, con la misión de "prever la toma de observaciones meteorológicas en las estaciones militares en el interior del continente y

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

hicieron llamar hidrólogos. Asimismo, para dejar en claro que esta "rama" no se ocuparía de la explotación comercial de las aguas minerales. Una de las razones sustentada en la propuesta era que el nuevo organismo permitiría la incorporación de la Comisión Internacional de Glaciares (CIG), fundada en 1894, del Congreso Geológico Internacional, la cual casi había dejado de existir como resultado de la Primera Guerra Mundial. Así, en la Asamblea General de la IUGG en Madrid (1924), la Subdirección de Hidrología creó una Comisión de Glaciares con la misión de reunir y publicar datos relacionados con los glaciares (informes de glaciares) («IAHS», s. f.). La incorporación de la CIG en la Comisión de Glaciares fue aprobada en la Asamblea de Praga en 1927. Dado que los temas de la "nieve" se volvieron cada vez más interesantes, a principios de los años treinta, también se creó una Comisión sobre Nieve. En la Asamblea de Edimburgo en 1936 se decidió, sin embargo, fusionar las dos comisiones glaciológicas en una nueva Comisión sobre Glaciares y Nieve; mas, debido al estallido de la Segunda Guerra Mundial, las actividades se detuvieron. Durante la primera Asamblea después de la guerra, Oslo 1948, la Comisión de Glaciares y Nieve reapareció bajo su nombre actual: Comisión de Nieve y Hielo.

2.7.4. *American Geophysical Union*

La American Geophysical Union (AGU) es una organización sin fines de lucro de geofísicos, que consta de más de 62,000 miembros de 144 países. Las actividades de AGU se centran en la organización y difusión de información científica en el campo interdisciplinario e internacional de la geofísica. Las ciencias geofísicas involucran cuatro áreas fundamentales: ciencias atmosféricas y oceánicas, ciencias de la tierra sólida, ciencias hidrológicas, y ciencias espaciales. La sede de la organización se encuentra en Washington, DC.

La AGU fue establecida en diciembre de 1919, por el Consejo Nacional de Investigación (NRC), para representar a los Estados Unidos en la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG), y su primer presidente fue William Bowie de la Costa de Estados Unidos; en tanto que la Encuesta Geodésica (USCGS), funcionó como un afiliado no incorporado de la Academia Nacional de Ciencias («Origin and development of the American Geophysical Union, 1919–1952», 1954). El 29 de junio de 1972, se incorporó AGU en el distrito de Columbia y se abrió la membresía a científicos y estudiantes de todo el mundo. La AGU estaba destinada a promover la geofísica "pura", conformando su propia sociedad: la

Sociedad de Exploración Geofísica. En un informe de marzo de 1919, presentado por el comité presidido por Robert S. Woodward de la Institución Carnegie, la geofísica fue definida como una colección de "tierras fronterizas" (temas estrechamente relacionados y mutuamente dependientes): astronomía, geodesia, geología, meteorología, mareología (oceanografía), sismología, magnetismo terrestre, electricidad terrestre, mareas y vulcanología. La AGU se organizó en siete secciones: Geodesia, Sismología, Meteorología, Magnetismo Terrestre y Electricidad, Oceanografía, Vulcanología y Química Geofísica. La Hidrología se agregó en 1930 y la Tectonofísica en 1940.

2.8. Periodo de Racionalización (A partir de 1930)

En este período aparecen los grandes hidrólogos que utilizan el análisis racional para resolver los problemas hidrológicos planteados, así por ejemplo destacan los siguientes nombres: Sherman (1932), con el concepto del hidrograma unitario; Hartan (1953), con la teoría de la infiltración de la lluvia; Theis (1952), quien introduce el concepto del no equilibrio en la hidráulica de pozos; Gumbel (1941), que propone la distribución de probabilidades de valores extremos; Hazen (1930) promueve el uso de la estadística en la hidrología; Bernard (1944) discute el papel de la meteorología y marca el inicio de la hidrometeorología; y Einstein (1950), quien introduce el análisis teórico en los estudios de sedimentación. Otro notable desarrollo en este período fue el establecimiento de muchos laboratorios hidráulicos e hidrológicos en el mundo.

2.8.1. L. K. Sherman

Introducido por L. K. Sherman (1932), se define al Hidrograma de Escorrentía Directa (HED) como el resultante de 1 mm de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje, a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva. Sherman basó su teoría en la existencia de una relación lineal entre la precipitación escurrida y la escorrentía (Hunt, 1985). Considera las siguientes suposiciones básicas:

- (a) El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva, lo cual se traduce como condición que las lluvias seleccionadas para su derivación sean de corta duración a fin de obtener una forma adecuada del hidrograma.
- (b) El exceso de precipitación está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje. Esta suposición implica que el

- área de la cuenca no puede ser excesivamente grande, en general no mayor a 5000 km².
- (c) El tiempo base de HED resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
 - (d) Las ordenadas de todos los HED de un tiempo base común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.
 - (e) Para una cuenca dada, el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca.

La forma del hidrograma unitario, como se caracteriza por su pico y retraso de tiempo, es una medida de la cantidad de difusión que prevalece en la cuenca. Las cuencas más inclinadas tendrán poca difusión de escorrentía, mientras que las cuencas más moderadas pueden tener una cantidad más significativa (Ponce, 2009). La difusión actúa para separar los flujos en el tiempo y el espacio. Menos difusión significa hidrogramas agudos con poca atenuación; más difusión, hidrogramas sustancialmente atenuados. Por lo tanto, menos/más difusión se traduce en un retraso de tiempo más corto / más largo.

2.8.2. *Robert E. Horton*

El estadounidense Robert Elmer Horton (1875 - 1945) fue ingeniero civil y científico del suelo, considerado por muchos como el padre de la moderna hidrología. Nacido en Parma, Michigan, obtuvo su licenciatura en Albion College en 1897. Después de su graduación, se fue a trabajar para su tío, George Rafter, un prominente ingeniero civil. Rafter había encargado un estudio de vertedero, cuyos resultados analizó y resumió Horton. En 1900, fue nombrado Ingeniero del distrito de Nueva York del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Durante sus estudios de las corrientes de Nueva York, Horton determinó que el grado en que las precipitaciones podían alcanzar el acuífero dependía de una cierta propiedad del suelo, a la que llamó capacidad de infiltración. Él analizó y separó el ciclo del agua en los procesos de infiltración, evaporación, intercepción, transpiración, flujo sobre tierra, etc. Horton fue el primero en demarcar y etiquetar estas etapas del ciclo ya conocidas.

Horton es muy conocido por su estudio sobre la máxima generación de escorrentía e inundaciones. Su concepto de máxima precipitación posible, que limita el efecto de la lluvia en regiones específicas, ha tenido un efecto importante en la meteorología. Sus estudios sobre el flujo

terrestre ayudaron a comprender la erosión del suelo y proporcionaron una base científica para los esfuerzos de conservación del suelo (Horton, 1940).

Al principio de su carrera, tras darse cuenta de que el carácter físico del terreno desempeñaba un papel importante en la determinación de los patrones de escorrentía, resolvió aislar los factores físicos que afectan la escorrentía y la descarga de las inundaciones. Él consideró que estos incluyen la densidad de drenaje, la pendiente del canal, la longitud del flujo superficial y otros factores menos importantes. Sin embargo, al final de su carrera, comenzó a defender un mecanismo muy diferente de la geomorfología "hidrofísica" que, según creía, explicaba mejor sus observaciones anteriores.

Detalló su teoría en un documento histórico publicado en 1945, solo un mes antes de su muerte, en el Boletín de la Sociedad Geológica de América. Allí resumió sus conclusiones con cuatro leyes: la ley de los números de las corrientes, la ley de las longitudes de las corrientes, los límites de la capacidad de infiltración y la relación de escorrentía-detención-almacenamiento. Sus resultados demuestran que el factor sobresaliente en la erosión acuosa del suelo es la longitud mínima del flujo superficial necesario en la producción de suficiente escorrentía como para generar erosión. Este trabajo seminal puede ser considerado la fundación de modelado de la química en la corriente moderna, debido a que fue el primer conjunto completo de modelos matemáticos para vincular la hidrología de la cuenca con un contaminante del agua, es decir, el sedimento.

Horton define por primera vez la Capacidad de Infiltración como la velocidad máxima a la que un suelo está sometido, cuando en una condición dada puede absorber la lluvia mientras cae. La capacidad de infiltración es usualmente designada por f , y puesto que f varía con el tiempo, especialmente durante la primera parte de la lluvia, se debe entender que la condición del suelo y , por lo tanto, la capacidad de infiltración, varían con el tiempo hasta alcanzar cierta capacidad mínima de infiltración f_c . La Ecuación propuesta por Horton es como se plantea en la Ecuación 26 (Horton, 1940).

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-K_f t}$$

Ecuación 26 Fórmula de Horton

En un documento anterior, el autor demostró que f tiene un valor inicial f_0 al comienzo de la lluvia y si esta continúa a una intensidad $i > f$, la capacidad de infiltración disminuirá con la duración de la lluvia de acuerdo con la ecuación planteada.

2.8.3. Charles V. Theis

Charles Vernon Theis (1900-1987) fue el primer hidrólogo en desarrollar un modelo matemático riguroso de flujo transitorio de agua a un pozo de bombeo, tras reconocer la analogía física entre el flujo de calor en sólidos y el flujo de agua subterránea en medios porosos. La solución de Theis (o el método de Theis no equilibrado) introdujo una herramienta pionera para determinar las propiedades hidráulicas (transmisividad y almacenamiento) de los acuíferos confinados no acuíferos (HydroSOLVE, 2018). El análisis con el método de Theis se realiza al hacer coincidir la curva de tipo de Theis con los datos de extracción graficados en función del tiempo en ejes logarítmicos dobles. En 1952, reporta un trabajo donde desarrolla algunos de los conceptos básicos sobre la que está fundada gran parte de nuestra teoría actual de la hidrología de aguas subterráneas (Theis, 1952). (Figura 2.52).



Charles V. Theis



Figura 2.52. (a) Charles V. Theis. (b) Publicación de Charles Theis en 1952 (Theis, 1952)

Las ecuaciones formuladas por Theis son representadas en la Ecuación 27, siendo s la función de abatimientos y $w(u)$ la función pozo que viene de "well" en inglés:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u)$$

Ecuación 27 Fórmula de Theis y
w(u) función pozo

$$w(u) = -0,5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots$$

2.8.4. Emil Julius Gumbel

Emil J. Gumbel (1891-1966), quien desarrolló la distribución Gumbel de estadísticos extremos, nació el 18 de julio de 1891 en Munich, Alemania, y falleció a los 75 años el 10 de setiembre de 1966. Estudió en el prestigioso Kaiser-Wilhelms-Gymnasium, donde se graduó en julio de 1910 (Ponce, 2018). Posteriormente, continuó sus estudios en matemáticas y economía política en la Universidad Ludwig-Maximilian de Munich. Se especializó en estadística y obtuvo un diploma en febrero de 1913. Durante los siguientes dos semestres, Gumbel escribió su tesis y el 24 de julio de 1914 recibió su doctorado en economía política con los más altos honores (Figura 2.53).



Figura 2.53. Emil Julius Gumbel (Ponce, 2018)

En 1923, Gumbel recibió su habilitación en Heidelberg, convirtiéndose en profesor de estadística matemática. La hostilidad de varios de sus colegas y estudiantes con sus ideas y su actividad política sumió su

carrera universitaria en el caos. Fue suspendido varias veces, dejando Alemania para desplazarse hacia Moscú. Pese a su nombramiento como profesor extraordinario, Gumbel fue finalmente expulsado de su puesto en Heidelberg en vísperas del Tercer Reich. A pesar de una carrera científica interrumpida por el exilio (a Francia en 1932, luego a los Estados Unidos en 1940), el pacifista de origen alemán Gumbel fue el principal arquitecto de la teoría estadística de los valores extremos (Hertz, 2001).

Al desarrollar su "teoría del valor máximo", Gumbel redescubrió, amplió y correlacionó varias publicaciones sobre extremos llevadas a cabo a principios de siglo por varios autores que aparentemente no estaban al tanto del trabajo de los demás. La estructura teórica se completó en 1943 con la declaración y la prueba del teorema sobre el límite de extremos. Solo existen tres tipos de leyes límite para el valor máximo. Una de las tres distribuciones limitantes había sido encontrada por M. Fréchet en 1926. La segunda fue nombrada después por Weibull (1887-1979), un ingeniero sueco, quien la aplicó a problemas de confianza desde mediados de la década de 1930. Gumbel hizo hincapié en el interés teórico y práctico de la tercera distribución, que lógicamente recibió su nombre.

En teoría de probabilidad y estadística, la "distribución de Gumbel" es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo); por lo que se usa para calcular valores extremos. Su utilidad podría verificarse al representar la distribución del máximo nivel de un río a partir de los datos de niveles máximos durante un periodo determinado de años. En este sentido resulta útil para la predicción de eventos naturales como terremotos, inundaciones o cualquier otro desastre natural que pueda ocurrir. La aplicabilidad potencial de la distribución de Gumbel para representar los máximos se debe a la teoría de valores extremos, la cual indica que probablemente sea útil si la muestra de datos tiene una distribución normal o exponencial (Ponce, 2018). La distribución estándar de Gumbel es el caso donde $\mu = 0$ y $\sigma = 1$ con la función acumulada, se representa según la Ecuación 28.

$$F(x) = e^{-e^{-x}}$$

Ecuación 28 Distribución
estándar de Gumbel

Las contribuciones de Gumbel se resumen en su libro *Statistics of Extremes*, publicado en Nueva York en 1958. El libro, ampliamente

difundido, es el primer tratado que estuvo enteramente dedicado a este campo; de allí que alcanzara más ediciones en 1960 y 1979. Incluso aparecieron una traducción al japonés en 1963 y una edición rusa, bajo la dirección de Gnedenko, en 1965.

2.8.5. Allen Hazen

Allen Hazen (1869 - 1930) (Figura 2.54), experto en hidráulica, control de inundaciones, purificación de agua y tratamiento de aguas residuales. Ampliamente reconocido por sus contribuciones a la hidráulica con la ecuación de Hazen-Williams. Desarrolló trabajos fundamentales sobre sedimentación y filtración. Fue presidente de la Asociación de Obras Hidráulicas de Nueva Inglaterra y vicepresidente de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (Fuller, 1930).



Figura 2.54. Allen Hazen («Hazen-Williams coefficient | This Day in Water History», 2013)

Hazen estudió química y entró en contacto con el profesor William T. Sedgwick, el Dr. Thomas M. Drown y sus compañeros George W. Fuller y George C. Whipple. Como resultado directo de su asociación con el Dr. Thomas M. Drown, se le ofreció a Hazen su primer trabajo en la Estación Experimental Lawrence (LES) en Lawrence, Massachusetts. LES fue, probablemente, el primer instituto en el mundo dedicado a las investigaciones de purificación de agua y tratamiento de aguas

residuales, de forma exclusiva. De 1888 a 1893, Hazen dirigió el equipo de investigación de este innovador instituto.

Los primeros trabajos de Hazen en la Estación Experimental Lawrence establecieron algunos de los parámetros básicos para el diseño de filtros lentos de arena. Una de sus mayores contribuciones a la tecnología de filtración fue la derivación de dos términos para describir la distribución del tamaño de los medios filtrantes: tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. Estos dos parámetros se usan hoy en día con el objetivo de especificar el tamaño de los materiales de filtro para aplicaciones de purificación de agua. Su primer libro, *The Filtration of Public Water Supplies*, que se publicó en 1895, todavía se considera un clásico.

Su aporte más importante y conocido corresponde a la ecuación de pérdidas de energía o pérdidas de carga, denominada ecuación de Hazen-Williams. Debido a la complejidad de las ecuaciones de Prandtl y von Kármán, se siguió un camino diferente para conseguir las ecuaciones que permitan realizar cálculos y diseños de flujo en tuberías, especialmente para el caso del agua. Esto se dio con el abandono de la ecuación de Darcy-Weisbach, sin importar que fuera deducida de las teorías de la física, en razón de las ecuaciones no racionales basadas en procesos empíricos. Una de las ecuaciones empíricas más exitosas fue la planteada por Hazen-Williams (desarrollada por G. S. Williams y A. H. Hazen en 1906) (Saldarriaga, 2002). La forma original planteada en unidades del sistema internacional es la descrita en la Ecuación 29.

$$v = 0,849 C_{HW} R^{0,63} S^{0,54}$$

Ecuación 29 Ecuación de Hazen-Williams

Donde v es la velocidad media en la tubería en m/s, R en radio hidráulico en m., S es la pérdida de energía por unidad de peso (altura) por unidad de longitud y C_{HW} coeficiente de rugosidad de la tubería.

2.8.6. Vonnegut Bernard

Vonnegut Bernard (1914 - 1997). A inicios del siglo XX, los progresos en la comprensión de la dinámica atmosférica llevaron a la creación de la moderna previsión del tiempo calculada en base matemática. Bernard, en el año 1944, discute el papel de la Meteorología y marca el inicio de la Hidrometeorología. Fue un científico atmosférico estadounidense a

quien se le atribuye el descubrimiento de que el yoduro de plata podía ser usado efectivamente en la siembra de nubes para producir nieve y lluvia. (Figura 2.55).



Figura 2.55. Vonnegut Bernard (Macho, 2014)

En 1945, Vonnegut empezó a trabajar en el Laboratorio de Investigación de General Electric en Schenectady, Nueva York. Fue allí, el 14 de noviembre de 1946, cuando descubrió que el yoduro de plata podía usarse como agente nucleante para sembrar nubes (Macho, 2014). El proceso consistía en la inserción de grandes cantidades de un agente de nucleación en las nubes para facilitar la formación de cristales de hielo. La intención de este proceso es provocar lluvia o nieve. Las empresas que producen estos tipos de precipitaciones aún usan yoduro de plata como agente nucleante en las nubes de siembra.

2.8.7. Albert Einstein

Albert Einstein (1879 - 1955), el científico más famoso del siglo XX, ha conseguido perpetuar su legado décadas después de su muerte. Albert Einstein (Figura 2.56) —nacido alemán, posteriormente nacionalizado como suizo y al final, también estadounidense— dejó para la posteridad grandes teorías, frases memorables y la que seguramente es la ecuación más popular de la historia de la ciencia: $E=mc^2$, la equivalencia entre masa y energía con la velocidad de la luz al cuadrado como factor de

multiplicación. Einstein, pacifista convencido, siempre consideró que haber instado al presidente Roosevelt a financiar la investigación nuclear, donde su famosa fórmula despejó el camino para la obtención de la bomba atómica, fue uno de los mayores errores de su vida, aun sabiendo que su contribución fue necesaria para ganar la carrera a Alemania («Albert Einstein, el genio del siglo XX», s. f.).

Con la física como punto de partida, sus descubrimientos han dejado huella en campos muy diversos, y sus predicciones (la última de ellas, las ondas gravitacionales) aún siguen confirmándose hoy en día. Su condición de ícono popular llevó a que se le ofreciera incluso la presidencia de Israel, honor que declinó emocionadamente.



Figura 2.56. (a) Albert Einstein, el genio del siglo XX. (b) Escultura en el Parque de las Ciencias de Granada

Conocido el interés que tuvo Einstein por tantos y diversos temas, no tendría nada de inusual su Investigación sobre los meandros; sin embargo, debe reconocerse que se trata de un tema muy específico de hidráulica fluvial, que resultó ser un tanto aislado dentro de su enorme producción científica y humanista (Rocha, 2010). Recordemos que no solo escribió un artículo sobre los meandros, sino que previamente había dictado una conferencia sobre el tema. ¿Acaso recordó los meandros que en su niñez vio en el Danubio? ¿Es que tuvo un interés por ellos como consecuencia de una conversación con su hijo Hans Albert, graduado de ingeniero civil en Zúrich el mismo año en que escribió el artículo? ¡Quién sabe!, pero lo que no se debe desconocer es que, por sus trabajos de física, Einstein tuvo que estudiar profundamente la fuerza de Coriolis, así

como los problemas relacionados a la curvatura en general; de aquí se deduce que no es realmente extraño que se interesase por la curvatura de los ríos y buscara su propia explicación del efecto de Coriolis.

El artículo de Einstein que aparece en 1926 resulta en verdad breve. Menos de tres páginas, tres figuras muy simples y tan solo una fórmula. Aquí puede extrapolarse las palabras de Einstein, dichas en otro contexto, pero aplicables a su explicación del origen de los meandros: "Desde que los matemáticos invadieron la teoría de la relatividad, yo mismo no la entiendo más". (Figura 2.57).

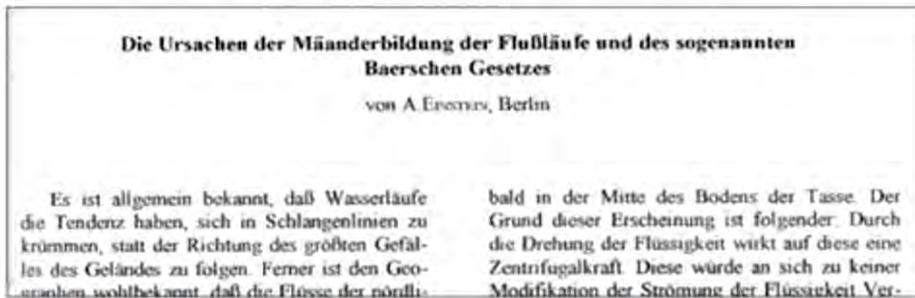


Figura 2.57. Artículo de Einstein sobre los meandros (Einstein, 1926)

En el título de su trabajo sobre el origen de los meandros, Einstein hace referencia a la ley de Baer. La cual consiste básicamente en que, debido a la rotación de la Tierra, en el hemisferio norte la erosión fluvial se presenta principalmente en la margen derecha; en tanto que en el hemisferio sur ocurre en la izquierda. Esta muy discutida ley se debe a las observaciones realizadas por el biólogo y geógrafo Karl Ernst von Baer (1860).

Einstein continúa su artículo con gran modestia, señalando su poca seguridad de que lo que escribe sobre el origen de los meandros sea algo nuevo para los especialistas. Sin embargo, añade que al no haber encontrado a nadie que explique las relaciones causales correspondientes, resulta pertinente dar una corta y cualitativa exposición de ellas (Rocha, 2010).

De un modo que recuerda a Galileo (quien se refirió a la naturaleza como el gran libro abierto ante nuestros ojos) y al sabio de Ulm (como si estuviese mirando el curso fluvial), Albert Einstein dice: "Es de conocimiento general que cursos de agua tienden a formar curvas, en lugar de hacer un recorrido recto siguiendo la inclinación del terreno

según la línea de máxima pendiente". Como se percibe, Einstein amaba la sencillez y se inspiraba en el mundo natural, lo que no ocurre con muchos científicos, quizás por eso dijo alguna vez: "Cada día sabemos más y entendemos menos".

Señaló, además, que aun en los tramos fluviales que no son curvos se presenta un movimiento circular, aunque muy pequeño, y que se debe a la influencia de la rotación de la Tierra. En su artículo, afirmaba también que el ajuste de la distribución de velocidades como consecuencia de la fricción interna contrarresta lentamente las consecuencias del movimiento circular. Su conclusión fue que el desarrollo de un flujo helicoidal favorece la formación de los meandros (Illy, 2012).

Muchos estudiosos se han interesado por los meandros; sin embargo, muy pocos autores mencionan la contribución de Einstein a su esclarecimiento. No debe olvidarse que el artículo de este genio del siglo XX sobre los meandros ayudó considerablemente a entender, de un modo muy simple, la participación del flujo helicoidal en la formación de los meandros, en la determinación de su longitud y en su propagación hacia aguas abajo.

2.8.8. *Hans Albert Einstein*

Hans Albert Einstein (1904 – 1973), hijo de Albert Einstein nacido en Berna, Suiza. Su figura es muy conocida entre los especialistas en hidráulica fluvial por sus trabajos sobre Transporte de Sedimentos, específicamente, debido a la fórmula que lleva su nombre y se usa para determinar la capacidad de transporte de sólidos de los cursos de agua. Hans Albert se recibió de ingeniero civil en 1926, el mismo año en que su padre escribió el artículo sobre los meandros. Obtuvo su doctorado en Zúrich en 1936 con la tesis "El Transporte Sólido de Fondo como un Problema Probabilístico". Fue colaborador de Meyer-Peter. Más tarde, en 1938, se trasladó a Estados Unidos y continuó sus investigaciones sobre transporte de sedimentos en el U.S. Department of Agriculture Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, de donde resultó su famosa fórmula para el cálculo del transporte sólido ("The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows"). En 1947 se incorporó como profesor en Berkeley, California (Rocha, 2010).

Hans Albert Einstein participó en el Estudio de Factibilidad del Proyecto Chira-Piura (1968) y, junto con J. S. Long, preparó el documento preliminar

titulado "Report on the Sediment Inflow into the Proposed Poechos Reservoir" (Figura 2.58). En aquella oportunidad, visitó el Laboratorio Nacional de Hidráulica y conoció el primer modelo de fondo móvil que se ha investigado en nuestro Laboratorio.



Figura 2.58. Reporte de Hans Albert Einstein (1968) (Rocha, 2010)

2.8.9. L. A. Richards

L. A. Richards señala que el flujo de líquidos en medios porosos insaturados sigue las leyes ordinarias de hidrodinámica, el movimiento producido por la gravedad y la fuerza del gradiente de presión que actúa en el líquido. Al hacer uso de la ley de Darcy, el flujo es proporcional a las fuerzas que producen dicho flujo, esto se grafica en la Ecuación 30 (Richards, 1931).

$$K\nabla^2\Psi + \nabla K \cdot \nabla\Psi + g \frac{\partial K}{\partial z} = -p_s A \frac{\partial\Psi}{\partial t} \cdot m$$

Ecuación 30 Ecuación de Richards

Esta ecuación puede derivarse para la conducción capilar de líquidos en medios porosos. Es posible determinar experimentalmente el potencial capilar $\Psi = \int dp / \rho$, la conductividad capilar K, que se define por el flujo según $q = K(g - \nabla\Psi)$, y la capacidad capilar A, que es la tasa de cambio del contenido líquido del medio con respecto a Ψ . Estas variables son análogas, respectivamente, a la temperatura, conductividad térmica, y capacidad térmica en el caso del flujo de calor. Los datos y la aplicación de las ecuaciones se hacen para la conducción capilar de agua a través de

suelo ligero y arcilla, pero las formulaciones matemáticas y los métodos experimentales desarrollados se pueden utilizar con el objetivo de expresar flujo capilar para otros líquidos y medios. La posible existencia de un efecto de histéresis entre el potencial capilar y el contenido de humedad de un medio poroso.

2.8.10. Natural Resources Conservation Service

El Natural Resources Conservation Service (NRCS), fundado el 20 de abril de 1932 y anteriormente conocido como Servicio de Conservación de Suelos (SCS), es una agencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) que brinda asistencia técnica a los agricultores y otros propietarios, así como a administradores privados.

Su nombre fue cambiado en 1994, durante la presidencia de Bill Clinton, a fin de reflejar su misión más amplia. Es una agencia relativamente pequeña, actualmente comprende alrededor de 12,000 empleados (NRCS People, s. f.). Su misión es mejorar, proteger y conservar los recursos naturales en tierras privadas a través de una asociación de cooperación con agencias estatales y locales. Si bien se enfoca principalmente en las tierras agrícolas, ha realizado también muchas contribuciones técnicas para el levantamiento de suelos, la clasificación y la mejora de la calidad del agua (NRCS Soils, s. f.). Un ejemplo es el Proyecto de Evaluación de Efectos de Conservación (CEAP), establecido para cuantificar los beneficios de los esfuerzos de conservación agrícola promovidos y respaldados por los programas en la Ley de Seguridad Agrícola e Inversión Rural de 2002 (Ley Agrícola 2002). NRCS es la agencia líder en este proyecto.

La gestión del agua se esfuerza en administrar y controlar el flujo de agua de modo que sea eficiente, causando la menor cantidad de daños a la vida y a la propiedad. («NRCS Water Management», s. f.). Esto ayuda a proporcionar protección en áreas de alto riesgo de inundación. La gestión del agua de riego es la forma más eficiente de utilizar y reciclar los recursos hídricos con que cuentan los propietarios de las tierras y los agricultores; en tanto que la gestión del drenaje es la manipulación de las redes de drenaje de la superficie secundaria, con el objetivo de dispersar adecuadamente el agua en las áreas geográficas correctas («NRCS Drainage Page», s. f.). La visión de ingeniería de NRCS está constantemente mejorando los sistemas de riego, de manera que incorpore todos los aspectos de la restauración del agua.

2.9. Periodo de Teorización, Globalización y Virtualización (A partir de 1950)

Alrededor del año 1950 las aproximaciones teóricas tuvieron un uso extensivo en los problemas hidrológicos, debido a que muchos principios racionales propuestos anteriormente podían ser sujetos a un verdadero análisis matemático. Los instrumentos sofisticados y las computadoras de alta velocidad iniciaron su desarrollo y entonces pudieron tomarse medidas delicadas del fenómeno hidrológico y resolver ecuaciones matemáticas complicadas, involucradas en la aplicación de las modernas teorías hidrológicas. Son ejemplos de los estudios hidrológicos teóricos, el análisis lineal y no lineal de sistemas hidrológicos, la adopción de los conceptos estadísticos y transitorios en la hidrodinámica del agua subterránea, la aplicación de las teorías de transferencia de masa y calor al análisis de evaporaciones, el estudio energético y dinámico de la humedad del suelo, la generación secuencial de datos hidrológicos y del uso de la investigación de operaciones en el diseño de sistemas de recursos hidráulicos.

2.9.1. *Stanford Watershed Model*

A principios de la década de 1960, el Stanford Watershed Model (SWM) fue fundamental para introducir a la profesión de la ingeniería civil en el concepto de modelado hidrológico continuo. Durante los primeros años del 70, los desarrolladores de SWM lo ampliaron y perfeccionaron para crear el Hydrocomp Simulation Program (HSP), que también incluía cargas de fuentes generales no puntuales y capacidades de simulación de la calidad del agua. Asimismo, en la década de 1970, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) promulgó el desarrollo de los modelos de carga de contaminantes ARM (gestión de escorrentía agrícola) y NPS (fuente no puntual) con la finalidad de abordar la contaminación proveniente de usos agrícolas, urbanos y otros manejos de la tierra; el enfoque de SWM fue seleccionado como la base hidrológica para un conjunto en expansión de modelos de impactos de contaminación no puntuales (Imhoff & Donigian, 2005). En 1981, el Servicio Geológico de EE. UU. comenzó a desarrollar herramientas de software que facilitarían el modelado de cuencas proporcionando capacidades interactivas para el modelo como desarrollo de insumos, almacenamiento y análisis de datos, y análisis de resultados del modelo, incluida la asistencia de calibración hidrológica. En la Figura 2.59, se muestra la forma general del modelo SWM.

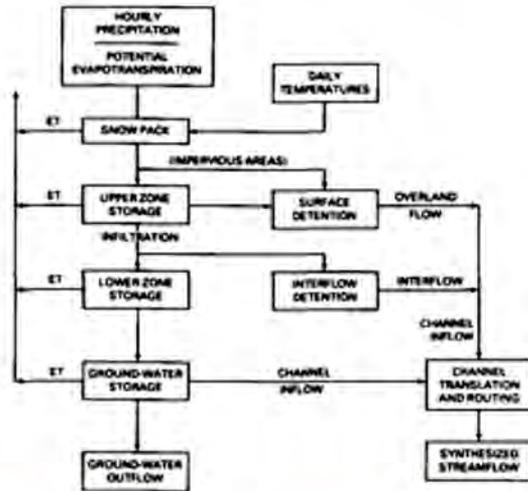


Figura 2.59. Forma general del Stanford Watershed Model or SWM (after Crawford and Linsley, 1966)

Este modelo describe todos los procesos de los componentes de un sistema hidrológico. Consiste en una serie de interconexiones y reservorios que representan los elementos físicos en una cuenca donde se recargan por lluvia, infiltración y percolación y se vacían por evaporación, escorrentía, drenaje, etc. Se emplean ecuaciones semiempíricas en este método y los parámetros del modelo se evalúan no solo a partir de datos de campo sino también a través de la calibración, la cual requiere una gran cantidad de registros meteorológicos e hidrológicos. La calibración implica ajuste de curvas que dificultan la interpretación, por lo tanto, el efecto del cambio en el uso de la tierra no puede predecirse con mucha confianza; de allí que se hayan generado muchos modelos conceptuales con diversos grados de complejidad. Stanford Watershed Model IV (SWM) es el primer modelo conceptual importante desarrollado por Crawford y Linsley en 1966 con 16 a 20 parámetros (Crawford & Linsley, 1966). En la Figura 2.60 se muestra la evolución histórica del modelo.

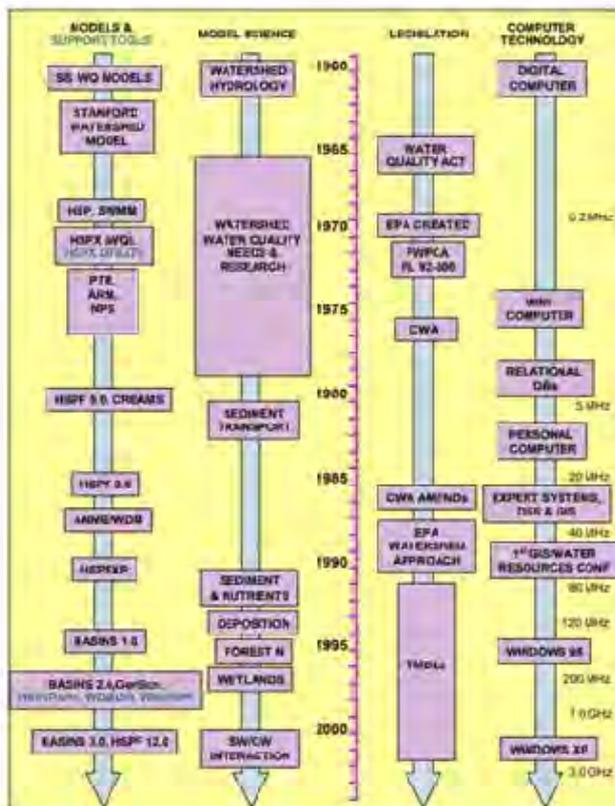


Figura 2.60. Evolución watershed modelling, 1960 – 2004 (Imhoff & Dorflinger, 2005)

La evolución de 40 años del SWM hasta su versión actual dentro del sistema EPA BASINS es un excelente ejemplo de agencias de gobierno, universidades y organizaciones privadas que persiguen esfuerzos de cooperación—tanto investigación como aplicación— con la intención de satisfacer una necesidad pública de herramientas avanzadas para el análisis y la gestión de sistemas de recursos hídricos.

2.9.2. Hydrologic Engineering Center

El Hydrologic Engineering Center (HEC) se trata de una organización dentro del Instituto de Recursos Hídricos. Es el Centro de Peritaje designado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. en las áreas técnicas de hidrología de aguas superficiales y subterráneas, hidráulica fluvial y transporte de sedimentos, estadísticas hidrológicas y análisis de riesgos, análisis de sistemas de yacimientos, análisis de planificación, gestión de control de agua en tiempo real y una serie de

otros temas técnicos estrechamente asociados. HEC respalda las oficinas locales, las oficinas centrales y los laboratorios de Corps al proporcionar métodos técnicos y orientación, modelos de recursos hídricos y servicios asociados, capacitación y talleres; tanto como realizar investigación y desarrollo, y brindar asistencia técnica y proyectos especiales («Hydrologic Engineering Center Home Page», s. f.). (Figura 2.61).



US Army Corps
of Engineers
Hydrologic Engineering Center

Figura 2.61. Logotipo identificación US Army Corps of Engineers

El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (USACE) (CEIWR-HEC) se formó en 1964, con la pretensión de institucionalizar la experiencia técnica que posteriormente se conocería como ingeniería hidrológica. El equipo de ingenieros que llegó a USACE después de la Segunda Guerra Mundial se acercaba a la edad de jubilación, y existía la preocupación de que su experiencia —la cual se había moldeado a partir de las actividades de desarrollo de recursos hídricos sin precedentes de USACE— se disiparía y sería difícil restaurarla. CEIWR-HEC se estableció en el Distrito Sacramento de USACE dentro de la División de Ingeniería. Los directores involucrados incluyeron nombres como Albert Cochran, Jefe de Hidrología e Hidráulica de HQUSACE, quien formó y vendió la idea de CEIWR-HEC; Emilio Gómez, Jefe de la División de Ingeniería del Distrito de Sacramento; y Roy Beard, Jefe de Control de Yacimientos del Distrito y, posteriormente, Director Fundador de CEIWR-HEC. Inmediatamente CEIWR-HEC se puso a trabajar organizando y presentando cursos de capacitación, el primero de este tipo en USACE; de este modo se dio inicio al desarrollo de lo que luego se convertiría en la conocida familia de software CEIWR-HEC. Los primeros paquetes de software fueron HEC-1 (hidrología de cuencas hidrográficas), HEC-2 (hidráulica de ríos), HEC-3 (análisis de reservorios para conservación) y

HEC-4 (programa de generación de flujo de corrientes estocásticas). Diez años después de su establecimiento, el campo técnico del análisis de planificación y la aplicación de métodos analíticos para proyectar actividades estrechamente relacionadas con la ingeniería hidrológica se agregaron a la misión CEIWR-HEC. En ese momento, el personal permanente se había elevado a una treintena de ingenieros y especialistas en informática («Hydrologic Engineering Centre History», s. f.).

En su historia, CEIWR-HEC atravesó una serie de lineamientos de informes organizacionales; no obstante, mantuvo generalmente el mismo alcance de actividades, personal, apoyo a la ética de campo y productos de salida. CEIWR-HEC pasó de ser una jefatura de Ingeniería del Distrito de Sacramento a informar al Comandante de Distrito y, a principios de la década de 1970, fue realineado para informar al Comandante de la División del Pacífico Sur, luego al Director de Obras Civiles de HQUSACE, y finalmente se convirtió en organización dentro del Centro de Apoyo de Recursos de Agua (WRSC). CEIWR-HEC permaneció asignado a WRSC durante aproximadamente veinte años, hasta que este último se disolvió en el año 2000 para ser reemplazado por el Instituto de Recursos Hídricos (CEIWR): en aquel entonces una organización hermana de CEIWR-HEC dentro de WRSC. Actualmente, CEIWR-HEC es un organismo dentro de CEIWR («Hydrologic Engineering Centre History», s. f.).

Con los años, CEIWR-HEC desarrolló y publicó una serie de documentos de métodos técnicos que abordan toda la gama de ingeniería hidrológica y tecnologías de análisis de planificación. El formato y el contenido de los cursos cortos técnicos evolucionaron y, aun hoy, continúan siendo un pilar del programa CEIWR-HEC. La familia de software ha crecido a más de veinte grandes piezas de software y son compatibles con una biblioteca de software de utilidad, así como con adiciones recientes que incluyen soporte GIS. CEIWR-HEC es quizás mejor conocido, a nivel nacional e internacional, por estos programas de ingeniería hidrológica.

CEIWR-HEC está estructurado en una Oficina Ejecutiva y tres divisiones: Hidrología e Hidráulica; Sistemas de recursos de agua; y Sistemas de gestión del agua. El personal de todas las divisiones realiza capacitación, documentación de métodos, investigación y desarrollo, asistencia técnica y proyectos especiales («Hydrologic Engineering Centre History», s. f.). Los logros recientes más importantes incluyen el desarrollo de la próxima generación del software sucesor CEIWR-HEC (HEC-RAS, HEC-

HMS, HEC-FDA y HEC-ResSim); proporcionar liderazgo en el establecimiento de análisis de riesgos, como la tecnología de base para la planificación y el análisis de reducción de daños por inundación. Así también, el desarrollo e implementación del Sistema de Gestión del Agua del Cuerpo (CWMS), el sistema de previsión en tiempo real y soporte de decisiones que se utiliza 24/7 en la ejecución de la misión de gestión del control de los recursos hídricos del USACE Civil Works.

2.9.3. United States Environmental Protection Agency

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, fundada el 2 de diciembre de 1970, elaboró el modelo de gestión de aguas pluviales de la EPA (Storm Water Management Model, SWMM), el cual se utiliza para simulaciones en periodo extendido de la cantidad y calidad de la escorrentía de agua en áreas principalmente urbanas; aunque también hay muchas aplicaciones que se pueden dar en sistemas de drenaje dentro de áreas no urbanas. Se utiliza en todo el mundo para la planificación, el análisis y el diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, las alcantarillas combinadas y sanitarias y otros sistemas de drenaje. SWMM se desarrolló con la intención de respaldar los objetivos locales, estatales y nacionales de gestión de aguas pluviales a fin de reducir la escorrentía mediante la infiltración y la retención; y, además, ayudar a reducir las descargas que causan el deterioro de los cuerpos de agua de nuestra nación (United States Environmental Protection Agency [US EPA], 2014a). (Figura 2.62).



Figura 2.62. (a) EPA (Environmental Protection Agency).
(b) SWMM (Storm Water Management Model)

SWMM se ha sometido a varias actualizaciones importantes desde que se desarrolló por primera vez en 1971, incluidas las prácticas adicionales de infraestructura verde como controles de desarrollo de bajo impacto (LID). Se emplea ampliamente para evaluar las estrategias de control de aguas pluviales de infraestructura gris, como tuberías y desagües pluviales, y es una herramienta útil para crear soluciones de control de aguas pluviales híbridas verdes / grises rentables.

La misma EPA, generó EPANET, este se usa en todo el mundo para modelar sistemas de distribución de agua. Se recurre a esta aplicación de software para realizar simulaciones de período prolongado del comportamiento de la calidad hidráulica y del agua dentro de las redes de tuberías presurizadas, que consisten en tuberías, nodos (uniones), bombas, válvulas, tanques de almacenamiento y depósitos (US EPA, 2014b). Puede emplearse para rastrear el flujo de agua en cada tubería, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque, una concentración química, la edad del agua y el seguimiento de la fuente en toda la red durante un período de simulación.

2.9.4. *Illinois State Water Survey*

El Illinois State Water Survey ha sido líder en el estudio de los recursos hídricos durante más de un siglo. Sus programas de investigación y servicio brindan a los ciudadanos, a las industrias y a las agencias gubernamentales en todos los niveles, información y análisis oportunos basados en la ciencia y que son necesarios en la administración inteligente de nuestros recursos hídricos para el desarrollo económico y un medio ambiente sostenible («Welcome to the Illinois State Water Survey», 2018). (Figura 2.63).



Figura 2.63. Logotipo Illinois State Water Survey

El ILLUDAS fue concebido para el diseño hidrológico de sistemas de drenaje pluvial en áreas urbanas y para la evaluación de un sistema existente. El método se basa en un modelo digital que se conoce como ILLUDAS, simulador del área de drenaje urbano de Illinois. ILLUDAS hace uso de un patrón de lluvia temporal distribuido uniformemente sobre la cuenca como la entrada principal, esto con la finalidad de predecir la escorrentía de la tormenta en áreas pavimentadas y en áreas con césped. La cuenca se divide en subcuencas, una para cada punto de su diseño. Los hidrogramas del área pavimentada y área de césped se producen en cada subcuenca mediante la aplicación del patrón de precipitación a las áreas contribuyentes apropiadas. Estos hidrogramas se combinan y se dirigen aguas abajo de un punto de diseño al siguiente hasta que se alcanza la salida (Terstriep & Stall, 1974). Los tamaños de tubería se determinan en cada punto de diseño. El almacenamiento por retención puede ser incluido como parte del diseño en cualquier subcuenca. En el reporte del modelo hay una descripción del desarrollo teórico, así como la verificación del modelo a través de su aplicación a 21 cuencas urbanas existentes y 2 cuencas rurales.

2.9.5. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), con fecha de fundación del 16 de octubre de 1945, es un organismo especializado de la ONU que dirige las actividades internacionales encaminadas a erradicar el hambre (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s. f.). La FAO contribuye a lograr una mayor coherencia en políticas e investigación sobre cambio climático y biodiversidad. Sus kits de herramientas proveen ayuda a los usuarios en la obtención de recursos legales, financieros y técnicos para mejorar el manejo de la tierra y el agua. (Figura 2.64).



Organización de las Naciones
Unidas para la Agricultura
y la Alimentación - FAO

Figura 2.64. Logotipo Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

En medio de preocupaciones crecientes sobre la escasez de tierra y agua en un mundo con 7 mil millones de personas que alimentar, los profesionales en tierras y agua de hoy necesitan acceso fácil a información actualizada, modelos, enfoques y tecnologías para la producción sostenible de alimento. La FAO cuenta con una base de datos y softwares de última generación para el monitoreo y manejo de las muchas variables requeridas, que garanticen la seguridad alimentaria mientras se minimizan los impactos ambientales. Todos los modelos de softwares independientes de la FAO y otras herramientas pueden ser descargados, gratuitamente, para su uso directo en el campo o para apoyar en proyectos de investigación. Las bases de datos y modelos de softwares claves incluyen AQUASTAT: Sistema de información global de agua de la FAO; AQUACROP: Modelo de software líder en la industria sobre la productividad cultivo-agua; AQUAMAPS: Base de datos espacial global de agua y agricultura; GAEZ: Zonas Agro-Ecológicas Globales (FAO, 2018).

La Base de datos armonizada de los suelos del mundo contiene 15 000 unidades de mapeo de suelos, combinando actualizaciones regionales y nacionales de información de suelos existentes a nivel mundial.

2.9.6. Organización Meteorológica Mundial

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), fundada el 23 de marzo de 1950, es un organismo especializado de las Naciones Unidas integrado por 191 Estados y Territorios Miembros. Es portavoz autorizado del sistema de las Naciones Unidas sobre el estado y el comportamiento de la atmósfera de la Tierra, su interacción con la tierra y los océanos, el tiempo y el clima que genera, y la consiguiente distribución de los recursos hídricos. Como el tiempo, el clima y el ciclo del agua no conocen fronteras nacionales, la cooperación internacional a escala mundial es esencial para impulsar el desarrollo de la meteorología y la hidrología operativa, así como para recoger los beneficios derivados de su aplicación. La OMM proporciona el marco para esa cooperación internacional. La visión de la OMM consiste en asumir un liderazgo mundial en el desarrollo de conocimientos técnicos y en la cooperación internacional en los ámbitos del tiempo, el clima, la hidrología y los recursos hídricos, así también, en otras cuestiones medioambientales conexas, y contribuir de ese modo a la seguridad y al bienestar de todos los pueblos del mundo y a la prosperidad económica de todas las naciones (World Meteorological Organisation [WMO], 2018). (Figura 2.65).



Figura 2.65. Logotipo Organización Meteorológica Mundial

2.9.7. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) es un organismo especializado del Sistema de las Naciones Unidas (ONU). La UNESCO obra por crear condiciones propicias para un diálogo entre las civilizaciones, las culturas y los pueblos, fundado en el respeto de los valores comunes. Asimismo, contribuye a la conservación de la paz y a la seguridad mundial, mediante la promoción de la cooperación entre las naciones a través de la educación, la ciencia, la cultura, la comunicación y la información («UNESCO», s. f.). (Figura 2.66).



Figura 2.66. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)

En la actualidad, cuenta con 195 Estados Miembros y 10 Miembros Asociados. Estos últimos son territorios o grupos de territorios que no asumen por sí mismos la conducción de sus relaciones exteriores. La UNESCO tiene sede en París, fuera de la cual agrupa más de 50 oficinas. Este organismo nació de las cenizas de la Segunda Guerra Mundial cuando, en noviembre de 1945, se celebró en Londres, justo al concluir la guerra, una conferencia de las Naciones Unidas para establecer una organización educativa y cultural. El evento reunió a representantes de 37 Estados —entre ellos México— quienes, con el impulso de Francia y del Reino Unido (dos naciones muy afectadas por el conflicto), decidieron crear una organización destinada a instituir una verdadera cultura de paz, cuya finalidad fuese fortalecer la solidaridad intelectual y moral de la humanidad e impedir una nueva guerra mundial. Al final de la conferencia, los 37 Estados firmaron la Constitución que marcó el origen de la UNESCO.

El documento entró en vigor en noviembre de 1946, tras ser ratificado por 20 países signatarios. En 1958 se inaugura en París el edificio de la Sede permanente de la UNESCO, proyectado por los arquitectos Marcel breuer (EE.UU.), Pier-Luigi Nervi (Italia) y Bernard Zehrfuss (Francia).

El Programa Hidrológico Internacional (PHI) es el único programa intergubernamental del sistema de las Naciones Unidas dedicado a la investigación, la educación y el fortalecimiento de capacidades en materia de hidrología («UNESCO Hidrología», 2015). Implementado en fases de 6 años, y desde 2014 en fases de 8 años, este Programa promueve y apoya la investigación hidrológica, respaldando a los Estados Miembros en materia de Investigación y capacitación. Actualmente se encuentra en su octava fase, la misma que se lleva a cabo durante el periodo 2014-2021.

2.9.8. Global Water Partnership

La Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership, GWP) es una red internacional, creada en 1996, que está abierta a todas las organizaciones involucradas en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Promueve y apoya actividades en el ámbito nacional y regional. Además de agencias de desarrollo y organismos gubernamentales, incluye ONG y organizaciones de Investigación. (Figura 2.67).



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.

3. LA HIDROLOGÍA EN EL PERÚ



LA HIDROLOGÍA EN EL PERÚ

3.1. Antecedentes

El aprovechamiento de limitados recursos de agua en zonas desérticas dio origen a las "Culturas Hidráulicas" caracterizadas por lo siguiente: (a) Una sólida organización encargada de distribuir el agua y conservar los sistemas hidráulicos; (b) Regulaciones esenciales para el buen funcionamiento de la organización; (c) Una autoridad para supervisar el cumplimiento de las obligaciones y resolver conflictos (Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI], 2008b). Cuando la organización, las regulaciones y la autoridad fallaron, las culturas hidráulicas entraron en decadencia. El Perú tiene una larga tradición en el riego como base de la actividad agraria y que, además, fue sustento de la sociedad andina. Los antiguos pobladores de la costa realizaron grandes obras de ingeniería para aprovechar los escasos recursos hídricos disponibles. Asimismo, crearon una fuerte y centralizada organización que giraba en torno al riego.

En el Periodo Formativo, 3000 años A.C., la cultura Chavín inicia el riego con pequeños canales. En el Periodo Floreciente, 100 años A.C., la cultura Mochica emprende un vasto sistema de riego que se extendió entre Lambayeque y Nepeña. Su apogeo se sitúa entre los siglos III y IX de nuestra era. El "Canal La Cumbre" (110 km de longitud), el "Acueducto Ascope" —ambos en Chicama— y la represa San José son las obras más importantes (MINAGRI, 2008b). La cultura Nazca (100 A.C.) construyó los famosos acueductos subterráneos en el mismo cauce del río, con la intención de recolectar el agua del subsuelo y utilizarla en el periodo de estiaje. Los túneles, muchos con más de 1 km de longitud, tienen aberturas ("ojos") para realizar el mantenimiento.

En el Periodo Tardío, floreció la cultura Chimú (siglos VIII y IX), ocupando una larga faja de la costa (Olmos-Pativilca). Ellos irrigaron los intervalles por medio de grandes canales, al estilo egipcio, para aprovechar al máximo las aguas de las avenidas. "Pabur" (Piura), "Raca Rumi" y "Cucureque" (Lambayeque) son sus canales de riego más importantes. En el Periodo Inca (siglos XII al XIV) se continúa el aprovechamiento de las tierras del desierto, así también, se impulsa el desarrollo de las laderas y de las quebradas de los cerros en la sierra, a través de la construcción de andenes. Aprovechan al máximo el agua evitando su desperdicio y mal uso; de allí que existiesen penas muy severas para quienes alteraran el reparto. La limpieza anual de los canales fue una tarea obligatoria; el

curaca o cacique era el responsable en la organización de estas labores, acompañado por el "varayoc" o alcalde. Algunos historiadores consideran, además, una superficie cultivada en la costa (siglos XIII-XIV) con más de 700,000 ha, cuyos cultivos sembrados habitualmente fueron: maíz, algodón nativo, pallar, frijol... por ser de bajo consumo de agua (MINAGRI, 2008a).

En el Perú colonial (siglos XV-XVIII), la agricultura fue reemplazada por la actividad minera. El área de cultivo solo alcanzó unas 300,000 ha. El proceso de despoblación indígena, las guerras pizarristas, las "mitas" y la viruela contribuyeron a esta decadencia. Durante este periodo se destacaron disposiciones en torno al aprovechamiento y administración de las aguas como la Real Cédula del 20 de noviembre de 1536, dada por el emperador Carlos V, la cual ordenaba que los españoles se repartieran el agua de acuerdo a los "usos y costumbres" de los indios y respetando sus derechos; el Reglamento de Antonio de Saavedra, Deán de la Catedral de Trujillo (1660); y, el Reglamento de Cerdán (1793), Juez de Aguas y Oidor de la Audiencia.

A comienzos del siglo XX, Periodo Republicano, el Estado toma mayor interés en las obras de irrigación; por ende, se crea los siguientes organismos: Ingenieros de Minas y Aguas (1904), y el Servicio Hidrológico (1911). Asimismo, se contratan los servicios del Ing. Charles Sutton (1914), pionero de las irrigaciones, y se obtiene el primer préstamo para la ejecución de obras de irrigación.

En el segundo gobierno de Leguía (1919-30) se da comienzo a una política de irrigaciones, ejecutándose pequeños proyectos de riego y diversos estudios de irrigación (Olmos). En 1930 se crea la Dirección de Aguas e Irrigación, encargada de los estudios y ejecución de obras de regadío.

En 1945-48, se elaboró el Plan Nacional de Irrigación y Mejoramiento de Riego. Entre 1948 y 1956, el peso de las inversiones públicas alcanzó niveles sin precedentes: 50% respecto al total de la inversión pública de 1952. Se destacan las obras de derivación del río Quiroz al río Piura y la del Chotano al río Chancay-Lambayeque. De 1956 a 1968, se ejecuta la irrigación La Joya, las presas de San Lorenzo y Tinajones, iniciándose simultáneamente la ejecución de pequeños y medianos proyectos de irrigación. A partir de 1970 se da impulso a la construcción de los Grandes Proyectos hidráulicos, ubicados en su mayoría en la costa (MINAGRI, 2008b).

Los primeros estudios de planificación para el desarrollo de proyectos con sistemas de riego presurizado se realizaron en el país en la década del 60; el

Ministerio de Agricultura, en convenio con la Misión Técnica OEA-Israel, elaboró el estudio "Planificación de la Colonización del Proyecto La Joya", planteando conceptos y criterios de planificación hidráulica que sirvieron como lineamientos básicos para la elaboración de los estudios de los proyectos de Costa, especialmente los proyectos Majes, Chavimochic y otros.

Actualmente, existen en el país superficies regadas con sistemas presurizados que en su mayoría fueron desarrollados en la costa, específicamente en los departamentos de Ica (Pampas de Villacuri y valle de Ica, por iniciativa privada), Arequipa (Proyecto Majes y La Joya), en Tacna (La Yarada), y en La Libertad (Proyecto Chavimochic, valles de Chao, Virú y Moche) en donde se están sembrando cultivos para la exportación como el espárrago, el ají paprika, los árboles frutales (olivo, vid, cítricos), las hortalizas y las menestras (MINAGRI, 2008a). El crecimiento poblacional en la sierra del Perú viene generando la incorporación de terrenos agrícolas antes considerados de rotación, los cuales generalmente tienen pendientes pronunciadas que limitan el riego por gravedad y el uso de maquinaria. Por otra parte, las fuentes hídricas vienen sufriendo la progresiva disminución de sus caudales; hecho que genera conflictos por el uso del agua y la necesidad de utilizar, tanto para la conducción y la aplicación, mecanismos ahorradores de este recurso hídrico. Estas dos razones fundamentales hacen que muchas instituciones estén implementando sistemas de riego por aspersión y goteo.

3.2. El Manejo del Agua en el Perú

En la actualidad se da mayor importancia a los proyectos para la utilización de los recursos hidrológicos como sistemas coordinados; en consecuencia, los ingenieros civiles, los geólogos, los agrónomos y los ingenieros hidrólogos, entre otros, ocupados en tareas de planificación y preparación de proyectos, ya no trabajan aisladamente. Durante la fase de planificación es imprescindible organizar equipos en que, además de los ingenieros y otros científicos, colaboren sociólogos, geógrafos, economistas, especialistas de sociopolítica y representantes de las autoridades de planificación rural y urbana. Aun en cuanto a los aspectos técnicos de su tarea se refiere, el ingeniero trabaja como parte de un equipo que puede incluir físicos, matemáticos, meteorólogos, biólogos y economistas. Es regla general que el ingeniero especializado en cuestiones hidrológicas represente el papel principal ejerciendo la función de coordinador del proyecto.

Durante el siglo pasado, el gobierno peruano ha sido la máxima autoridad en lo que se refiere al manejo de los recursos hídricos, así también el principal

inversor en infraestructura hidráulica. El desarrollo hidráulico se centró en la construcción de infraestructura como presas y regadíos con el fin de hacer frente a la creciente demanda de agua de una población y un sector de agricultura en expansión, especialmente en la costa. Por ejemplo, en los años 50 y 60, se construyeron en la región norte las presas San Lorenzo y Tinajones, las más grandes del Perú. En los años 70, se continuó con el desarrollo de infraestructura hidráulica en la costa (MINAGRI, 2008a). En las zonas de la sierra y el Amazonas, los recursos hídricos han sido tradicionalmente gestionados mediante asociaciones informales de usuarios y los comités de regantes, quienes controlan las rudimentarias infraestructuras hidráulicas. El gobierno peruano ha tenido una presencia insuficiente en la zona, así como pocas inversiones estatales o internacionales.

Así pues, a comienzos del siglo XXI, Perú posee una zona costera con numerosa infraestructura hidráulica controlada por Juntas de Usuarios, estructuradas y desarrolladas. En la sierra y el Amazonas, con tierras de cultivos dispersas y de menos de una hectárea, la implantación de Juntas de Usuarios es un proceso aún en vías de implementación. Los comités de regantes siguen siendo un actor importante en la gestión de los recursos hídricos.

Durante los últimos cinco años, el gobierno peruano ha promovido la modernización del manejo de los recursos hídricos. La Estrategia Nacional para la Gestión de los Recursos Hídricos, aún pendiente de aprobación en el Congreso peruano, promueve la creación de un marco institucional y legal único —hasta ahora solo las leyes sectoriales se han encargado de la gestión del agua en su ámbito competencial—; persigue la sostenibilidad financiera de las Juntas de Usuarios para la operación, mantenimiento y desarrollo de infraestructuras; defiende la conservación de ecosistemas acuáticos; y contempla medidas para combatir y adaptarse a los impactos del cambio climático. Hoy en día, otros programas como el Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI) o PROFODUA, encargado del registro de los derechos de uso de agua, se están extendiendo a la sierra con el objeto de repetir en esta zona el éxito acontecido en la costa.

Varias investigaciones en curso vienen desarrollando temas como qué modelo dará resultados más compatibles con las descargas observadas (Devia, Ganasri & Dwarakish, 2015). Se argumentó que incluso el modelado complejo no proporciona mejores resultados. El cambio climático y la heterogeneidad del suelo tienen un papel importante en la búsqueda de la escurriencia superficial.

Una de las consecuencias más impactantes del crecimiento urbano corresponde a la intensificación de las inundaciones, tanto en sus frecuencias

como en sus magnitudes, según se ha observado en los últimos años (Figura 3.1, Figura 3.2). Así mismo, en las principales ciudades, son evidentes otras consecuencias de este fenómeno como la degradación de la calidad de las aguas de ríos y quebradas, fallas o malos funcionamientos de las redes de alcantarillado o de la infraestructura de saneamiento urbano en general, e incluso problemas institucionales ligados a sistemas cada vez más difíciles de gestionar (Torres & Sandoval, 2015). Sin embargo, se admite que existen retos en cuanto a la gestión sostenible del ciclo hidrológico, y que ello involucra paradigmas claves de sostenibilidad como el reciclado, la minimización de pérdidas y la protección ambiental. La hidrología intenta responder a algunos de los problemas mencionados, al estudiar las múltiples relaciones entre el ciclo hidrológico y la ciudad. La comunidad científica reconoce que dichos vínculos son complejos, por lo tanto, su entendimiento y manejo son objeto de diversas investigaciones en el mundo.



Figura 3.1. Inundaciones en el Perú («Inundaciones causan daños por segundo día consecutivo en Lima, Perú», 2017)



Figura 3.2. Perú: Dramático momento vivió mujer cuando fue arrastrada por huéico (Redacción, 2017)

3.3. Legislación de Aguas en el Perú

La norma más importante de la legislación peruana en materia de recursos hídricos, hasta 2009, fue la Ley General de Aguas, Decreto Ley N° 17752 promulgada en julio de 1969, en los inicios del Gobierno Militar que llevó adelante un importante proceso de reformas en la economía y la sociedad peruana («Centro Peruano de Estudios Sociales», s. f.).

Concebida como un complemento de la Ley de Reforma Agraria, la Ley General de Aguas estableció como norma fundamental que todas las aguas, sin excepción y cualquiera fuera su estado físico y ubicación, pertenecen al Estado, tomando clara distancia del hasta entonces vigente Código de Aguas de 1902. Como consecuencia de dicha norma, correspondía a la Autoridad de Aguas una serie de funciones y responsabilidades: facilitar el acceso a los particulares a los diversos usos, sancionarlos cuando incumplieran algunas de sus obligaciones, realizar estudios, encargarse del mantenimiento de la infraestructura hidráulica, entre otras. Para estos efectos la Autoridad de Aguas estaba diseñada en torno a una Dirección General de Aguas y un Administrador Técnico del Distrito de Riego, en cada uno de los ámbitos territoriales denominados "Distritos de Riego". Al Ministerio de Salud se encargó los asuntos relacionados a la calidad del agua. En el marco de la Ley General de Aguas, todos los particulares requerían una licencia, un permiso o una autorización para aprovechar el agua, con la sola excepción de la satisfacción de usos primarios («Desarrollo Comunal», s. f.).

La Ley General de Aguas sufrió algunos cambios durante sus casi 40 años de vigencia. Los principales estuvieron contenidos en el Decreto Legislativo N° 653, promulgado en 1991, durante el gobierno de Alberto Fujimori. Con este Decreto Legislativo se crearon las Autoridades Autónomas de Cuenca Hidrográfica (alterando la organización estatal establecida en 1969) y se rompió la lógica de la Ley, afectando particularmente el principio de aleatoriedad en el uso del agua.

Los cambios más importantes, sin embargo, se produjeron en la reglamentación de la Ley General de Aguas, dada por partes haciendo en total 9 reglamentos, los que han sufrido numerosos cambios en estos años. Entre los aspectos que sufrieron mayores alteraciones estaban los relativos a las organizaciones de usuarios, a las cuales se les fue transfiriendo paulatinamente mayores funciones y responsabilidades. Como parte de ese proceso de modificación paulatina de la legislación de aguas se trató de impulsar desde el Gobierno, entre 1993 y 1997, la aprobación de una nueva ley.

La vigencia de una nueva Constitución en 1993 y la aprobación de la Ley Orgánica de Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, en 1997, llevaron a la necesidad de una revisión y modificación de la Ley General de Aguas. Superados los intentos de Fujimori por aprobar una nueva ley de claro corte liberal, a partir de 2002 se retomó los intentos oficiales para su modificación. Recién en 2004 el Congreso asumió esta responsabilidad, pero sin mayor compromiso, en el año 2008 el gobierno de Alan García aprobó varios decretos legislativos (entre ellos el 1081 y el 1083) que modificaban el marco legislativo referente al agua. Finalmente, en marzo de 2009 el Congreso aprobó la Ley de Recursos Hídricos, derogando la Ley General de Aguas («Centro Peruano de Estudios Sociales», s. f.).

El 30 de marzo de 2009, se promulga la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, la cual derogó a la Ley General de Aguas y también (formalmente) a los Decretos Legislativos 1081 y 1083, aunque incorporó en gran medida a estos últimos en su texto.

La Ley tiene 125 artículos organizados en doce Títulos, al que se suma un Título Preliminar que incluye 11 principios que rigen el uso y la gestión del agua. Además, la Ley tiene 12 Disposiciones Complementarias Finales, 2 Disposiciones Complementarias Transitorias y una Disposición Complementaria Derogatoria.

Se mantiene el principio de que el agua es un recurso de propiedad de la Nación, descartando cualquier intento de privatización. Sin embargo, como las leyes vigentes desde hace unos años permiten, algunos aspectos y servicios relacionados a la gestión del recurso pueden ser entregados al sector privado.

La compleja estructura de la Autoridad Nacional del Agua —ANA—, dependiente del Ministerio de Agricultura, busca reforzar su papel como órgano rector del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Se ha limitado, no obstante, la participación efectiva de los usuarios en la gestión del recurso. Pese a la afirmación del principio de la descentralización de la gestión pública del agua, la estructura interna de la ANA muestra más bien un esquema desconcentrado, en el que los Consejos de Cuenca no parecen tener mayor peso y los gobiernos regionales tampoco.

El Reglamento de la Ley, el cual completaría los vacíos y respondería a las inquietudes que la lectura de la Ley plantea, debía publicarse dentro de los 60 días posteriores a su aprobación, pero recién fue publicado el 24 de marzo de 2010, mediante el Decreto Supremo N° 01-2010-AG.

3.4. Instituciones Referentes al Manejo y Gestión del Agua

3.4.1. Dirección de Hidrografía y Navegación

La historia de la Cartografía en el Perú data desde la presencia europea en el Pacífico americano, a partir de 1513, cuando los pilotos de entonces empezaron a mapear y describir la costa en la medida en que la exploraban. No sería hasta el establecimiento del virreinato que el tráfico marítimo tendría su mayor actividad, contando como eje principal el puerto del Callao («Dirección de Hidrografía y Navegación», s. f.).

Los primeros logros significativos se dieron en la segunda mitad del siglo XVII cuando aparecen los instrumentos de reflexión óptica para mediciones astronómicas. Luego, en 1780 empiezan a figurar nombres como Moraleda y Hervé, pilotos de la Armada Española, quienes levantaron la cartografía de nuestra costa bajo un nuevo rigor científico (Figura 3.3). Posteriormente, la Expedición de Malaspina (1789-1794) dejó un gran aporte al ejecutar importantes Investigaciones hidrográficas, cartográficas y oceanográficas (Palacios, Arana, Torres & Patrucco, 2016). El establecimiento de la Academia Real de Náutica de Lima y del Depósito Hidrográfico de Lima impulsaron la tarea del gran piloto español Andrés Baleato en el campo de la cartografía en nuestro medio, quien no solo produjo las cartas necesarias para la navegación, sino que también formó a los hombres que habrían de constituir la base humana de la Marina Republicana («Dirección de Hidrografía y Navegación», s. f.).



Figura 3.3. Brigada de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú

El legado de Andrés Balleato pasaría a manos de su alumno más brillante, el marino peruano Eduardo Carrasco y posteriormente a otros marinos notables que contribuyeron con su esfuerzo, trabajo e investigación al desarrollo de la hidrografía y la cartografía, entre ellos: Aurelio García y García, Rosendo Melo, Camilo Carrillo, Germán Stiglich y otros, quienes realizaron importantes exploraciones y trazaron los primeros mapas de nuestra Selva y Costa.

Según la Dirección de Hidrografía y Navegación (s. f.), finalmente se estableció el 20 de junio de 1903 la "Comisión Hidrográfica" en Lima, presidida por el contralmirante Manuel Melitón Carvajal y conformada por oficiales del Cuerpo General de la Armada. El presidente de la República, Eduardo L. De Romaña, considerando que los mapas de la República presentaban notables inexactitudes a causa de no haberse practicado levantamiento geodésico alguno en el territorio y debido también a que en la región del Oriente existía una gran extensión completamente inexplorada, principalmente en zonas de frontera, dispuso la constitución de la Comisión. Su misión principal fue fijar la situación geográfica de las ciudades y puertos principales del territorio, estudiar la costa del Pacífico y los ríos orientales levantando los planos necesarios. Del mismo modo, se encargó de la determinación de los datos que contribuyeran a la navegación, el levantamiento de las cartas náuticas que la facilitarían, además de explorar y trazar los primeros mapas de las zonas fronterizas del Nor Oriente (Figura 3.4).



Figura 3.4. Dirección de Hidrografía y Navegación, Marina de Guerra del Perú

De acuerdo con los avances científicos y desarrollos tecnológicos, así como por causa de las nuevas responsabilidades asignadas, la denominación de esta Comisión va cambiando a través del tiempo hasta llegar a su actual nombre: Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina (HIDRONAV). Hoy en día, después de un siglo de existencia, se continúa trabajando en la realización de las funciones encomendadas en los campos de hidrografía, cartografía náutica; geomática; oceanografía física; meteorología marítima y señalización náutica; cumpliendo siempre con los postulados de compromiso, lealtad y servicio legados por sus predecesores y en beneficio constante de la Marina de Guerra y el desarrollo socio económico del Perú.

3.4.2. Ministerio de Agricultura y Riego

Fue creado por Ley 9711 el 2 de enero de 1943, durante el gobierno de Manuel Prado Ugarteche, teniendo como ministro a Benjamín Roca. Su función principal es ocuparse del sector agrario del Perú, fortaleciendo las organizaciones de productores y promoviendo su integración bajo los enfoques de manejo de las cuencas y cadenas productivas. Como objetivos fundamentales tiene (MINAGRI, 2018):

- Fomentar la innovación tecnológica y capacitación vinculada a la gestión empresarial del productor agrario, facilitando asistencia técnica.
- Establecer un sistema de información agraria que permita a los agentes económicos una eficiente toma de decisiones para la gestión.
- Facilitar a los productores agrarios el acceso a servicios de asesoría jurídica, administrativa, de gestión, financiamiento, asistencia técnica, sanidad y otros que les permitan mejorar su capacidad de gestión.
- Facilitar la articulación de la pequeña agricultura con la economía de mercado, a través del establecimiento de políticas para el uso adecuado de los recursos naturales.

Los órganos adscritos al Ministerio son: Autoridad Nacional del Agua (ANA), Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú (SENASA), Sierra y Selva Exportadora, Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).

3.4.3. Ministerio del Ambiente

El Ministerio del Ambiente del Perú es un ente ministerial creado el 13 de mayo de 2008 mediante Decreto Legislativo N° 1013. Cumple el rol de ser rector del sector ambiental con las tareas de diseñar, establecer, ejecutar y supervisar la política nacional y sectorial ambiental. Posee dos Viceministerios: (a) Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales y (b) Gestión Ambiental. Tiene como funciones rectoras (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2018b):

- Formular, planificar, dirigir, coordinar, ejecutar, supervisar y evaluar la política nacional del ambiente aplicable a todos los niveles de gobierno en el marco del sistema nacional de gestión ambiental.
- Garantizar el cumplimiento de las normas ambientales por parte del Ministerio del Ambiente, los demás sectores y los diferentes niveles de gobierno; realizando funciones de promoción, fiscalización, supervisión, evaluación y control, así como ejercer la potestad sancionadora en materia de su competencia y dirigir el régimen de fiscalización y control ambiental y el régimen de incentivos previsto por la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.
- Realizar seguimiento y monitoreo, respecto de los logros en las metas ambientales a nivel nacional, regional y local y tomar las medidas correspondientes.
- Coordinar la implementación de la política nacional ambiental con los sectores, los gobiernos regionales y los gobiernos locales.
- Prestar apoyo técnico a los sectores, gobiernos regionales y locales para el adecuado cumplimiento de las funciones ambientales.

Dentro de la calidad del agua y efluentes, es la encargada de formular los Estándares de Calidad Ambiental para agua y Límites Máximos Permisibles para efluentes de las diferentes actividades, como resultado de un trabajo en conjunto con los sectores. Estos instrumentos normativos ayudan al cuidado y conservación de los recursos hídricos, tanto como con la protección de la salud de las personas (MINAM, 2018a).

3.4.4. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) es un organismo técnico especializado del Estado peruano que brinda

información sobre el pronóstico del tiempo, así como asesoría y estudios científicos en las áreas de hidrología, meteorología, agrometeorología y asuntos ambientales (Figura 3.5).

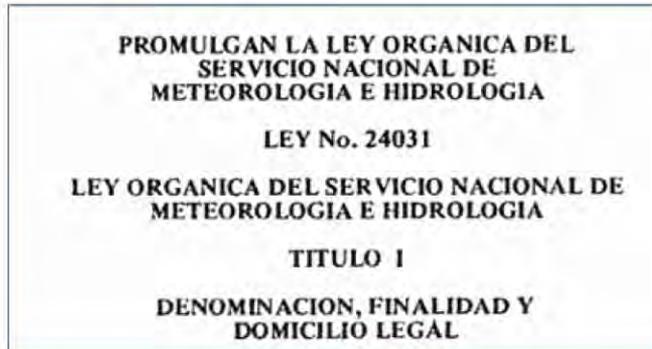


Figura 3.5. Promulgan Ley Orgánica del SENAMHI 14 de diciembre de 1984.

Se creó mediante el Decreto Ley N° 17532 del 25 de marzo de 1969 como un organismo público descentralizado, aunque sus actividades meteorológicas e hidrológicas se encontraban a cargo de los Ministerios de Fomento y Obras Públicas, Aeronáutica y Agricultura, así también de CORPAC. (Figura 3.6).



Figura 3.6. Logotipo SENAMHI

La ley orgánica del Senamhi se promulgó por Ley N° 24031 del 14 de diciembre de 1984; y, a partir del 13 de mayo de 2008, pasó a formar parte del Ministerio del Ambiente conforme al Decreto Legislativo N° 1013.

Como funciones del Senamhi se tiene (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2018):

- Organizar, controlar, operar y mantener la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas, Hidrológicas y Agrometeorológicas,

de conformidad con las normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y las necesidades de desarrollo nacional, a excepción de las redes de estaciones establecidas con fines específicos.

- Realizar y formular los estudios e investigaciones que satisfagan las necesidades de desarrollo y defensa nacional, en lo concerniente a su aplicación en las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras conexas.
- Asesorar y brindar apoyo técnico que requieran las entidades públicas y privadas para el desarrollo de actividades en las que sea necesario el empleo de información y técnicas relacionadas con las funciones del SENAMHI.
- Divulgar la información técnica y científica.
- Promover en coordinación con las universidades, la capacitación técnica y profesional en especialidades relativas al estudio, investigación y aplicación de los diversos elementos atmosféricos e hídricos continentales.
- Organizar y administrar el Archivo Nacional de Información Meteorológica, Hidrológica, Agrometeorológica y conexas y proporcionar la información necesaria para los planes de desarrollo nacionales, regionales y locales.
- Dictar normas y regulaciones relativas a la instalación, operación y mantenimiento de estaciones meteorológicas, hidrológicas y agrometeorológicas de la red nacional, así como de otras estaciones de fines específicos.
- Participar en todas las actividades de estudios y proyectos relacionados con el medio ambiente.
- El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, de acuerdo a su competencia técnica especializada, es la entidad encargada de expedir certificaciones de calibración y control del instrumental meteorológico e hidrológico, así como la de otorgar conformidad a la información meteorológica e hidrológica, que sea utilizada en el país para la elaboración de proyectos, ejecución de obras u otras actividades que se relacionen con la investigación, el comercio, la industria u otros fines productivos o no, los cuales requerirán de dicha autorización expresamente.
- Organizar, fomentar y dirigir, dentro del ámbito de su competencia técnica especializada, los estudios e investigaciones meteorológicas, hidrológicas, climatológicas y agro meteorológicas que se efectúen en el país por entidades nacionales y extranjeras, debiendo mantener para tal efecto un

- registro único a nivel nacional, de instituciones que cuenten con instrumental para la obtención de datos cualesquiera que sean los fines.
- Representar al Perú ante la Organización Meteorológica Mundial y en los certámenes relacionados con la meteorología, hidrología y agrometeorología, que se realicen en el país o en el extranjero.
 - Celebrar acuerdos y contratos de cooperación con entidades públicas y privadas, nacionales y proponer al presidente de la República convenios internacionales, en el ámbito de su competencia de acuerdo a los dispositivos legales vigentes.
 - El SENAMHI queda encargado de organizar, normar y promover un sistema de vigilancia atmosférica del país, a fin de preservar los peligros de la contaminación ambiental.
 - Cumplir otras funciones que le asigne la ley.

3.4.5. *Autoridad Nacional del Agua*

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es un organismo constitucional autónomo del Perú. Está adscrito al Ministerio de Agricultura y se encarga de realizar las acciones necesarias para el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas. Es el ente rector del Sistema Nacional de la Gestión de los Recursos Hídricos. (Figura 3.7).



Figura 3.7. Logotipo Autoridad Nacional del Agua

Fue creado por Decreto Legislativo 997 el 13 de marzo de 2008, durante el segundo gobierno del presidente Alan García (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2018). Su función principal es el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas, en el marco de la gestión integrada de los recursos naturales y de la gestión de la calidad ambiental nacional; para ello, cuenta con la potestad de establecer alianzas estratégicas con los gobiernos regionales, locales y el conjunto de actores sociales y

económicos involucrados. Tiene por objetivo administrar, conservar y proteger los recursos hídricos en las cuencas para alcanzar su aprovechamiento sostenible. En el artículo 15°, numeral 12, de la LRH, se establecen las funciones de la ANA («Ley No 29338 - Ley de Recursos Hídricos», 2009). Estas son:

- Ejercer jurisdicción administrativa exclusiva en materia de aguas, desarrollando acciones de administración, fiscalización, control y vigilancia para asegurar la preservación y conservación de las fuentes naturales de agua, de los bienes naturales asociados a estas y de la infraestructura hidráulica, ejerciendo facultad sancionadora y coactiva.
- En cuanto a la protección del agua, en el artículo 75° de la precitada ley, se precisa que “La Autoridad Nacional del Agua, con opinión del Consejo de Cuenca, debe velar por la protección del agua, que incluye la conservación y protección de sus fuentes, ecosistemas y bienes naturales asociados a ésta en el marco de la ley y demás normas aplicables. Cabe señalar que para dicho fin puede coordinar con las instituciones públicas competentes y los usuarios. La ANA, a través del consejo de cuenca correspondiente, ejerce funciones de vigilancia y fiscalización con el fin de prevenir y combatir los efectos de la contaminación del mar, ríos y lagos en lo que le compete. Puede coordinar con los sectores de la administración pública, los gobiernos regionales y los gobiernos locales. El Estado reconoce como zonas ambientalmente vulnerables las cabeceras de cuenca, es decir, donde se originan las aguas”.
- Asimismo, en el artículo 103°, numeral 103.1, del reglamento de la ley antes citada, se señala que “La protección del agua tiene por finalidad prevenir el deterioro de su calidad; proteger y mejorar el estado de sus fuentes naturales y los ecosistemas acuáticos; establecer medidas específicas para eliminar o reducir progresivamente los factores que generan su contaminación y degradación”.

3.4.6. Universidades y La Hidrología

3.4.6.1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Su origen es también el origen de la educación superior en el Perú, el cual se remonta a los estudios generales llevados en los claustros del Convento del Rosario de la Orden de Santo Domingo,

actual Basílica y Convento de Santo Domingo, cerca de la plaza de Armas de Lima hacia 1548. Dichos estudios tenían como objetivo principal satisfacer las necesidades de la formación y educación del clero en el nuevo territorio conquistado del imperio español. Posteriormente, el cabildo limeño enviaría a España a fray Tomás de San Martín y al capitán Juan Jerónimo de Aliaga, quienes —en gran parte gracias a las gestiones del primero— consiguen mediante la Real Cédula expedida el 12 de mayo de 1551 en Valladolid, la orden de fundación de la universidad por parte del emperador Carlos I de España y V del Sacro Imperio Romano Germánico y la reina Juana I de Castilla, hija de los reyes católicos; de ese modo se efectuó oficialmente la fundación de la Real Universidad de la Ciudad de los Reyes, también llamada Real Universidad de Lima. La lectura de la Real Cédula, que autoriza oficialmente el funcionamiento de la "Universidad de Lima", indica como misión: «adoctrinar a los vecinos de estas tierras en la fe cristiana y el sometimiento al Rey» (Universidad Nacional Mayor de San Marcos [UNMSM], 2011). Con este principio, la universidad comenzó a funcionar oficialmente el 2 de enero de 1553, en la Sala Capitular del "Convento de Nuestra Señora del Rosario" de la Orden de Santo Domingo, bajo la dirección de su primer rector fray Juan Bautista de la Roca; la cátedra inicial fue dictada por Andrés Cianca y Corona Cosme Carrillo, bajo la supervisión del rector. (Figura 3.8).



Figura 3.8. Escudo de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Por primera vez en el Perú, en 1969 se establece en la UNMSM la carrera de Ingeniería Mecánica de Fluidos, a iniciativa del entonces decano de la Facultad de Ciencias, Dr. Rafael Dávila Cuevas — Profesor Emérito ya fallecido— y con la colaboración del profesor Mateo Casaverde Ríos así como del ingeniero Guy Gerlier, experto en cooperación técnica de la embajada francesa, quienes elaboraron el primer plan de estudios (UNMSM, 2013). Esta Escuela Académico Profesional, según su denominación actual, tiene en su plan curricular asignaturas orientadas al uso y conservación del agua y administra un programa de Maestría en Ingeniería Hidráulica.

3.4.6.2. Universidad Nacional de Ingeniería

La Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) fue fundada en Lima en 1876 por el ingeniero polaco Eduardo de Habich (Figura 3.9), con la denominación formal de "Escuela de Construcciones Cíviles y de Minas de Lima" o "Escuela Especial de Ingenieros de Construcciones Cíviles y de Minas"; no obstante, ha sido conocida tradicionalmente como "Escuela de Ingenieros". Previamente, el científico peruano Mariano Eduardo de Rivero y Ustariz fundó en 1828 la Escuela de Minas de Lima, la cual décadas posteriores se integraría como parte de la Escuela de Minas, en el origen de la Universidad Nacional de Ingeniería. Asimismo, tiempo antes, en 1823, Rivero y Ustariz había creado la primera Escuela de Minas de la Gran Colombia cuando tenía 25 años de edad (Universidad Nacional de Ingeniería [UNI], 2010).



Figura 3.9. (a) Eduardo de Habich. (b) Escudo UNI

La fundación de la UNI se efectuó con el objetivo de impulsar el desarrollo del país en las áreas de su competencia. Como república joven, el Estado peruano promovió en gran magnitud, diversos esfuerzos con el fin de modernizar e industrializar el país. Por tanto, la construcción de ferrocarriles, la explotación minera, el desarrollo de infraestructura para caminos, entre otros, fueron realizados. En aquellas épocas, el principal promotor de grandes obras de infraestructura era la administración pública. Sin embargo, no se contaba con un cuerpo de profesionales nacionales que lideraran estos nuevos proyectos, por lo que en su mayoría se contrataban profesionales extranjeros y a los pocos peruanos que en ese entonces estudiaban en el exterior (López, 2003).

El 18 de marzo de 1876, luego de muchos intentos anteriores, se da el Reglamento General de Instrucción Pública, suerte de partida de nacimiento legal de la institución. La ceremonia de inauguración oficial se realizó a las 3 de la tarde del 23 de julio de 1876, en las instalaciones de la histórica Casona de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, aun cuando las clases habían empezado días antes: el 11 de julio.

La historia de la Ingeniería Civil en el Perú está ligada a la creación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), como el primer y principal centro de formación de ingenieros, arquitectos y científicos del país. Fue creada durante el gobierno del Dr. Manuel Pardo en 1876 con la denominación de Escuela Especial de Construcciones Civiles y de Minas del Perú, donde, desde sus inicios, se priorizó en la formación de ingenieros civiles (Facultad de Ingeniería Civil UNI [FIC-UNI], 2018). Durante el gobierno del presidente Manuel A. Odría, y mediante Ley N° 12379 del 19 de julio de 1955, la Escuela de Ingenieros se eleva al rango de Universidad, otorgándose a sus Departamentos la categoría y personería jurídica de Facultad, entre las que se encontraba la Facultad de Ingeniería Civil; la misma que actualmente es el alma mater de la ingeniería civil del Perú y goza de un sólido prestigio nacional e internacional.

La UNI cuenta con las maestrías de Tratamiento de Aguas y Reúso de Desechos e Ingeniería Hidráulica, ambas muy ligadas al quehacer de la hidrología y las ciencias del agua. Asimismo,

dispone del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) con sede en Lima - Perú, el cual fue creado el 12 de febrero de 1960 a partir del convenio celebrado entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Dirección de Aguas e Irrigaciones del entonces Ministerio de Fomento y Obras Públicas (Laboratorio Nacional de Hidráulica UNI [LNH-UNI], 2018). Con fecha 29 de marzo de 1967, siendo presidente de la República don Fernando Belaúnde Terry, se expide el Decreto Supremo 20-F, que determina la conversión del Laboratorio Nacional de Hidráulica a un Organismo Conjunto de la Dirección General de Irrigaciones del entonces Ministerio de Fomento y Obras Públicas y de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Posteriormente, a través del Decreto Supremo N° 009-90-AG del 01 de marzo de 1990, el Laboratorio Nacional de Hidráulica pasa a ser Órgano Autónomo de la Universidad Nacional de Ingeniería, dependiente del Rectorado, asumiendo funciones de empresa universitaria en base a los recursos propios que generen sus actividades.

El Laboratorio Nacional de Hidráulica ocupa un área de 17,000 m², de los cuales más de 12,000 m² se destinan para la reproducción de modelos (Figura 3.10). En las áreas techadas se encuentran diferentes ambientes, entre ellas, el Laboratorio Didáctico, el Canal de Calibración de Correntómetros y Estudios de Ingeniería Naval, la Biblioteca Técnica, Salón Auditorio, Oficinas y Talleres (LNH-UNI, 2018). El Laboratorio Nacional de Hidráulica cuenta con un Consejo Directivo conformado por tres miembros en representación de los Ministerios de Agricultura, Energía y Minas, y Transportes Vivienda y Construcción —actualmente este último ministerio se ha dividido en dos: Transportes y comunicaciones; y, Vivienda, Construcción y Saneamiento—; asimismo, con cuatro miembros de la Universidad Nacional de Ingeniería, designados por el rector: dos son representantes de la Facultad de Ingeniería Civil, uno de la Facultad de Ingeniería Geológica, Metalúrgica y Minas, y otro más de la Facultad de Ingeniería Mecánica.



Figura 3.10. Laboratorio Nacional de Hidráulica

3.4.6.3. Universidad Nacional Agraria La Molina

El origen de la Universidad Nacional Agraria se remonta a 1901, durante el gobierno del presidente Eduardo López de Romaña, cuando se planificó y organizó la Escuela Nacional de Agricultura y Veterinaria (ENAV) en base a los estudios de una misión belga contratada por el gobierno peruano, la cual llegó al Perú en julio de ese año y estuvo compuesta por los ingenieros Jorge Vanderghem, Enrique Van Hoorde, Víctor Marie y Juan Michel, así como por el médico veterinario Arturo Declerck (Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM], 2018).

La inauguración oficial fue el 22 de julio de 1902, como dependencia de la Dirección de Fomento, siendo ministro del ramo don Eugenio Larrabure Unanue. En 1912 se creó la Estación Central Agronómica con miras a desarrollar la experimentación agrícola y prestar servicio a los agricultores. Es así como, antes de cumplir quince años de fundación, la Escuela era ya una entidad que aplicaba los tres fines fundamentales de la Universidad: enseñanza, investigación y extensión. El primer local asignado a la Escuela fue un pabellón del fundo Santa Beatriz, donde funcionó durante 30 años. En 1933 se trasladó al fundo de La Molina, en el valle de Ate, permaneciendo allí hasta la fecha. La Ley Orgánica de Educación Pública de 1941 le concedió a esta Escuela la categoría de Institución de Enseñanza Superior y consagró su autonomía pedagógica, administrativa y económica (Figura 3.11).



Figura 3.1.5. Escudo de la Universidad Nacional Agraria La Molina

En 1960, la Ley Universitaria 13417 reconoció a la Escuela Nacional de Agricultura su rango universitario, con la denominación Universidad Nacional Agraria La Molina. En 1961, comenzaron a funcionar como organismos académicos, las siguientes facultades: Agronomía, Zootecnia, Ingeniería Agrícola y el Instituto de Investigaciones y Estudios Avanzados (hoy Escuela de Post Grado) (UNALM, 2018). El mismo año quedó sancionada la creación de la Facultad de Ciencias y la de Ciencias Económicas y Sociales, que más adelante cambió su denominación por la de Ciencias Sociales y posteriormente por la de Economía y Planificación. Ambas Facultades comenzaron sus labores simultáneamente a comienzos de 1962. En 1963 inició sus actividades la Facultad de Ciencias Forestales, en 1966 la Facultad de Pesquería, y en 1969 la Facultad de Industrias Alimentarias. Más adelante se organizaron los Institutos de Sierra, de Selva y de Investigaciones Forestales, como centros de enseñanza e investigación que abarcan campos afines a varias facultades para el estudio de problemas específicos.

La UNALM cuenta con la Facultad de Ingeniería Agrícola, a la cual está adscrito el Departamento de Recursos Hídricos. Se tiene programas de maestría en Recursos Hídricos, Riego y Drenaje y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. También cuenta con un Programa Doctoral en Recursos Hídricos. Dichos programas tienen como visión formar profesionales de alta capacidad científica y tecnológica para la solución de los problemas de ingeniería y

gestión sustentable de los recursos hídricos, en un ambiente de trabajo interdisciplinario y transdisciplinario. Todo esto mediante la formación de recursos humanos altamente calificados; la investigación científica básica y aplicada; el desarrollo, adaptación y transferencia de tecnología; la innovación en la ingeniería y gestión sustentable de los recursos hídricos; la prestación de servicios tecnológicos, de capacitación, de extensión, de información y de difusión del conocimiento científico y tecnológico.

3.4.6.4. Pontificia Universidad Católica del Perú

La PUCP fue fundada el 24 de marzo de 1917 (Figura 3.12), por el padre Jorge Dintilhac de la Congregación de los Sagrados Corazones y reconocida oficialmente por el Estado peruano esa misma fecha, a través de una resolución suprema firmada por el presidente José Pardo y Barreda (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP], 2018). Sus primeras facultades fueron la de Letras y la de Jurisprudencia, que comenzaron a funcionar en el Colegio Sagrados Corazones Recoleta, ubicado en la plaza Francia, en el centro de Lima. En los años siguientes, se crearían nuevas unidades de estudio: en 1932, el Instituto Superior de Ciencias Comerciales, el Instituto Femenino de Estudios Superiores, y el Instituto de Idiomas; en 1933, se aperturaron las facultades de Ingeniería y de Ciencias políticas y económicas; en 1935, la Escuela de Pedagogía; y en 1936, la Escuela Normal Urbana. Así también la Academia de Arte Católico fue fundada en el año 1939, y la Sección Superior de Pedagogía en 1942. Ese mismo año, al cumplir 25 de creación, la universidad recibe el título de "Pontificia", otorgado por el papa Pío XII.



Figura 3.12. Escudo de la Pontificia Universidad Católica del Perú

En 1944, fallece el pensador peruano José de la Riva-Agüero y Osma dejando en herencia a la Universidad Católica del Perú, el Fundo Pando (un terreno de 45 hectáreas), varios inmuebles en el centro de Lima, así como terrenos rurales en Lima y Pisco. De esta manera, José de la Riva-Agüero se convierte en el principal benefactor de la universidad hasta la actualidad (PUCP, 2018).

En 1959, se empezaron a construir los primeros edificios en el nuevo campus de la PUCP. Años después, en 1947, fue creada la Facultad de Educación y, en 1953, se inauguró el Instituto Riva-Agüero, en honor al gran benefactor de la universidad. En 1959, se crearon la Escuela de Estudios Religiosos y la Facultad de Agronomía, que sería desactivada años después. Entre 1953 y 1962, la PUCP se asoció a las principales organizaciones internacionales de universidades, entre las que figuran la Federación Internacional de Universidades Católicas y la Asociación Internacional de Universidades.

En 1965, la universidad ya contaba con 4.700 alumnos, y desarrolló un programa de crecimiento planificado mediante el cual el número de estudiantes creció controladamente en un 4% anual (hasta los casi 25.000 con que cuenta actualmente) (PUCP-Historia, 2018). El año siguiente, en 1966, se creó el Departamento de Ciencias que incluía las especialidades de Física, Matemáticas y Química. En 1972, se implementaron los programas de Estudios Generales constituidos como unidades académicas autónomas, divididas en dos grandes campos: Ciencias y Letras. En 1977, se aperturó el programa académico de Trabajo social, y en 1981, el de Arte. El 3 de febrero de 1986, se funda el nuevo Instituto de Idiomas (INIPUC), destinado a la enseñanza del idioma inglés y español.

La carrera profesional de Ingeniería Civil cuenta con un laboratorio de Hidráulica, este posee un canal de corriente horizontal de fabricación local que permite desarrollar flujos bajo compuertas, fuerza sobre compuertas, flujo uniforme en canales, flujo sobre vertederos, resalto hidráulico, energía específica, etc. (PUCP-LH, 2018). Además, se tiene a disposición un sistema de tuberías de fabricación local, un aparato de pruebas hidrostáticas y propiedades de los fluidos, un tanque de permeabilidad, un

sistema de bombeo cisterna a tanque elevado y una chimenea de equilibrio para el estudio de oscilaciones de masa en esquemas hidroeléctricos.

4. INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA



4.1. Generalidades

La hidrología y la gestión de los recursos hídricos de un país dependen, en gran medida, del conocimiento de las cuencas hidrológicas existentes, del potencial de estas y de la manera de gestionar adecuadamente los excedentes hídricos. En base al estudio de una cuenca es posible desarrollar un manejo hidrológico adecuado, siendo necesario registrar información a partir de estaciones de modo que se logren medidas consistentes de las variables hidrológicas. Actualmente existe una gran disponibilidad de sensores que registran información hidrológica con niveles de error aceptables.

El desarrollo tecnológico actual y de las últimas décadas nos lleva a usar los productos de los sensores remotos (satélite y radar) en la hidrología, por ejemplo, en la administración y planeamiento de las actividades de previsión y control de las crecidas e inundaciones. Asimismo, basado en la complejidad que tienen los sistemas naturales para su estudio, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) cada vez se hace más frecuente; puesto que en la mayoría de casos debemos realizar monitoreo, toma de muestras, etc. Estos procedimientos son muy complicados o de alto riesgo, por tanto, el uso de los VANT queda plenamente justificado.

4.2. Tecnología Satelital

4.2.1. Antecedentes Históricos

El Sputnik-1 fue lanzado desde Kazajistán —antes parte de la URSS— y su nombre, en ruso, significa “compañero de viaje”. Este hecho resultó un golpe para el gobierno estadounidense que se quedó absolutamente consternado, un país considerado por ellos tecnológicamente inferior lo había superado. Era la primera vez que un artefacto construido por el ser humano se ponía en órbita alrededor de la Tierra. Lo que definieron los medios como “carrera espacial” daba su partida con esta hazaña soviética publicada en todos los periódicos del mundo el 4 de octubre de 1957. Los americanos respondieron ante este nuevo reto anunciando un refuerzo de su programa de investigación espacial (Fernández, 2005).

El artífice del primer satélite artificial lanzado al espacio fue el ingeniero aeronáutico Serguéi Korolev, un brillante científico soviético, varias veces condecorado por sus servicios. Sin él, se cree que la URSS no habría logrado tomar la delantera en los primeros años de la carrera espacial. El Sputnik-1 era una esfera de algo más de medio metro de diámetro con cuatro largas antenas telescópicas que superaban los dos metros de longitud. Tenía una masa en órbita de poco más de 80 kilos y contaba con dos transmisores de radio en sendas frecuencias. Entre sus objetivos estaban medir la densidad de electrones en la ionosfera terrestre y enviar otros datos como la temperatura vía telemetría a su centro de control ubicado en Moscú (Fernández, 2005).

Un mes más tarde, en noviembre, lanzaron el Sputnik-2 en el que viajaba la perra Laika, con alimento, agua y aire para varios días, e instrumentos para registrar sus reacciones biológicas. La opinión pública estadounidense no salía de su asombro y se preguntaba: “¿qué será lo próximo?”. Tendrían que transcurrir unos años más para que el programa estadounidense comenzara a dar frutos hasta llegar al primer puesto de privilegio, que en los cincuenta se encontraba en manos de la Unión Soviética, cuyo gobierno no perdió oportunidad y sacó partido a sus triunfos propagandísticos en el cosmos.

En diciembre de 1957, Estados Unidos contraatacó mediante el lanzamiento del cohete Vanguard con un satélite en el que llevaban trabajando desde 1955, cuando el presidente Eisenhower había seleccionado el proyecto Vanguard de la armada para la investigación espacial. Sin embargo, el artefacto estadounidense explotó en la rampa de lanzamiento. Un mes después se lanzó con éxito el satélite Explorer 1 utilizando un cohete que había diseñado Von Braun. Sus instrumentos científicos hicieron un gran descubrimiento: dos franjas de radiación sobre la atmósfera terrestre, los cinturones Van Allen.

En julio de 1958, el presidente Eisenhower estableció la National Aeronautics and Space Agency (Agencia Espacial y Aeronáutica Nacional, NASA) que reclutó a siete astronautas y contrató a Von Braun como ingeniero jefe. Cuando Moscú puso en órbita al primer hombre en 1961 —Yuri Gagarin—, ambos países habían sacrificado a muchos animales y la carrera espacial se había convertido en una obsesión nacional.

4.2.2. Sensores y Satélites

En hidrología los satélites se usan para determinar la precipitación, número de días sin lluvia, estimación de lluvia en los modelos hidrológicos, estimación de la humedad del suelo por satélite. Una serie de misiones de observación de la Tierra realizada por la ESA (European Space Agency) proporcionan gran cantidad de datos. Lanzado en 2009, el satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity satellite) ha estado monitoreando la humedad del suelo y la salinidad de los océanos: dos variables claves del ciclo del agua de la Tierra. Mientras tanto, CryoSat, cuyo principal instrumento era SIRAL (SAR/Interferometric Radar Altimeter), tenía el objetivo de medir el espesor del hielo marino polar y vigilar los cambios en las capas de hielo en el manto de Groenlandia y la Antártida, proporcionando también información vital sobre los cambios en el nivel del mar. Los datos de gravedad del satélite GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) —que volvió a entrar en la atmósfera de la Tierra en 2013— hoy actúan como referencia y están siendo utilizados para hacer avances en nuestra comprensión de las corrientes oceánicas (ESA, 2016). Además, las misiones Sentinel (proyecto multi-satélite) para el programa Copernicus de la ESA están proporcionando información diaria sobre el hielo, masas de agua y la atmósfera. La Iniciativa del Cambio Climático de la ESA ayuda a abordar cuestiones relacionadas con el clima a través de la explotación de más de 30 años de datos de satélites, y sus proyectos se centran en diferentes variables climáticas, tales como gases de efecto invernadero, glaciares, hielo marino y la humedad del suelo.

ESA ejecuta una serie de proyectos centrados en el agua: la iniciativa TIGER entrena a las administraciones hidráulicas e investigadores africanos en la explotación de los datos de satélite y tecnología de observación de la Tierra para la gestión sostenible de los recursos hídricos; mientras que GlobWetland apoya la construcción de inventarios de humedales, así como el seguimiento y la evaluación de los ecosistemas de humedales con los datos de satélite. Con la colaboración de las organizaciones internacionales y la comunidad de usuarios, los jefes de las agencias espaciales acordaron continuar con el suministro de datos de espacio para la hidrología, y propondrán nuevas misiones para mejorar y complementar las medidas actuales en otros ámbitos relacionados con el medio ambiente y, específicamente, sobre el cambio climático.

Satélites de la NASA para el monitoreo de recursos hídricos («Landsat Missions Timeline», s. f.): Landsat: 07/1972 al presente; Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM): 11/1997 al 04/2015; Global Precipitation Measurements (GPM): 02/2014 al presente; Terra: 12/1999 al presente; Aqua: 05/2002 al presente; Soil Moisture Active Passive (SMAP): 01/2015 al presente; Gravity Recovery and Climate; Experiment (GRACE): 03/2002 al presente. Cada satélite lleva uno o más sensores/instrumentos con canales espectrales específicos para observar cantidades geofísicas (Figura 4.1).



Figura 4.1. Landsat- Satélites y sensores

En el campo de la hidrología, la misión Global Precipitation Measurement (GPM) es una red internacional de satélites que proporciona las observaciones globales de lluvia y nieve de la próxima generación. Sobre la base del éxito de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM), el concepto de GPM se centra en el despliegue de un satélite "Core" que lleva un radar / radiómetro avanzado, el cual consiste en un sistema que mide la precipitación desde el espacio y sirve como un estándar de referencia para unificar las mediciones de precipitación de una constelación de satélites operacionales y de investigación (NASA, 2018a). A través de mediciones mejoradas de precipitación a nivel mundial, la misión de GPM está ayudando a comprender más el ciclo de agua y energía de la Tierra, mejorar el pronóstico de eventos extremos que causan desastres naturales y ampliar las capacidades actuales a fin de utilizar información precisa y oportuna de precipitación para beneficiar directamente a la sociedad.

Con respecto a GPM, iniciado por la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) como sucesor global de TRMM, éste comprende un consorcio de agencias espaciales internacionales, incluido el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), la

Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) y otros. El GPM Core Observatory se lanzó el 27 de febrero de 2014 a las 1:37 p.m. EST del Centro Espacial Tanegashima, Japón. (Figura 4.2).



Figura 4.2. GPM Constellation Status

4.2.3. Estaciones Terrestres

Las estaciones terrestres de los Estados Unidos en Dakota del Sur y Alaska, así también las que se encuentran en Noruega, Alemania y Australia, sirven como instalaciones primarias de captura de datos y telemetría, seguimiento y control (TT & C) para las misiones satelitales USGS Landsat (USGS, 2018). La estación terrestre Landsat (LGS) se encuentra en el Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres (USGS) del Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS) en Sioux Falls, Dakota del Sur. LGS es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre de Svalbard (SGS) se encuentra en las instalaciones de SvalSat en Svalbard, Noruega. SGS es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre de Alice Springs (ASN) se ubica en las instalaciones de Geoscience Australia en Alice Springs, Australia. ASN es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre del Polo Norte (NPA) se localiza en la estación de satélite del Polo Norte en Alaska. NPA apoya la misión Landsat 7. La estación terrestre de Neustrelitz (NSN) se halla en las instalaciones del Segmento Nacional de Tierra en Neustrelitz, Alemania,

y apoya la misión Landsat 8. La estación terrestre de Gilmore Creek (GLC) se encuentra en la instalación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) cerca de Fairbanks, Alaska. GLC es compatible con la misión Landsat 8. (Figura 4.3).



Figura 4.3. Estaciones de la red terrestre de Landsat

4.2.4. Modelos de Sistemas Terrestres

Los modelos del sistema terrestre brindan información de valor añadido, basada en la fórmula que incluye: Percepción remota + Observaciones en la superficie + Modelos numéricos. (Figura 4.4) (NASA, 2018b).



Figura 4.4. Modelos de sistemas terrestres

Los modelos de la NASA que son útiles para la gestión de recursos hídricos (modelos atmósfera-océano-tierra) son:

- GEOS-5: The Goddard Earth Observing System Version 5 – Sistema Goddard de observación terrestre, versión 5.
- MERRA: Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Application – Análisis retrospectivo en la era moderna para investigación y aplicación.
- GLDAS: Global Land Data Assimilation System – Sistema de asimilación de datos terrestres globales.

El Global & North American Land Data Assimilation Systems, entre sus principales características tiene:

- (a) Integra observaciones terrestres y satelitales dentro de modelos numéricos sofisticados para producir campos físicamente consistentes de alta resolución de estados y flujos de la superficie terrestre.
- (b) Usa datos de MODIS, TRMM, GEOS.
- (c) El GLDAS y una versión del NLDAS usan el LIS (Land Information System) con diferentes fuentes de insumos; Análisis meteorológico; Radiación solar superficial; Precipitación; Textura del suelo; Clasificación de vegetación e índice de área de follaje y Topografía.
- (d) Rendimiento integrado para recursos hídricos, en cuanto a Humedad del suelo, Evapotranspiración, Escorrentía superficial/subterránea y Equivalente en agua de la nieve.

Los satélites tienen diferentes aplicaciones, por ejemplo, miden lo siguiente: Cantidad de lluvia (TRMM, GPM); Manto de nieve (Terra y Aqua MODIS); Humedad del suelo (SMAP, GLDAS); Evapotranspiración (Terra y Aqua MODIS, Landsat, GLDAS); Escorrentía/Flujo torrencial (TRMM, GPM, GLDAS).

4.2.5. Aplicaciones de Datos Satelitales

Las aplicaciones de los datos satelitales en la gestión del uso del agua son diversas, entre ellas tenemos: Asignación de agua, vía presupuesto hídrico; Gestión agrícola y de irrigación, con datos de precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración; Gestión de inundaciones/ sequía, usando datos de precipitación, escorrentía/flujo

torrencial, humedad del suelo, evapotranspiración y aguas subterráneas; Gestión de reservorios/represas, con datos de altura de embalses, precipitación, escorrentía/ flujo torrencial.

Algunos de los casos representativos de las aplicaciones de datos satelitales son:

- (a) El monitoreo del equilibrio hidrológico en la cuenca del Nilo, usando las capacidades de las observaciones y los sistemas de modelado de la NASA (Figura 4.5) (Zaitchik, 2018).

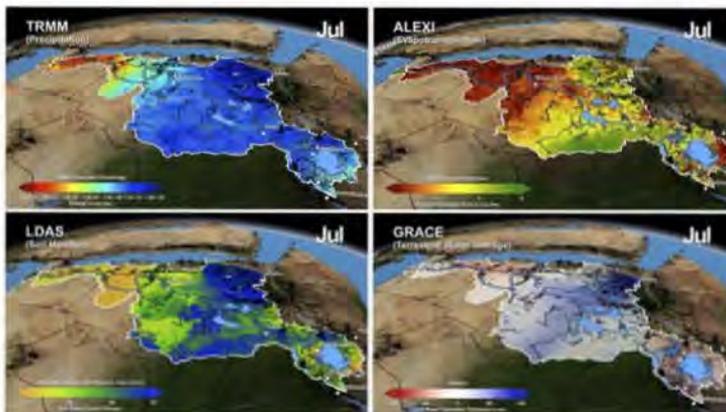


Figura 4.5. Monitoreo de la cuenca del río Nilo

- (b) Equilibrio hidrológico en escala en la cuenca del Nilo, basado en TRMM, ALEXI, LDAS y GRACE (Figura 4.6) (Zaitchik, 2013).

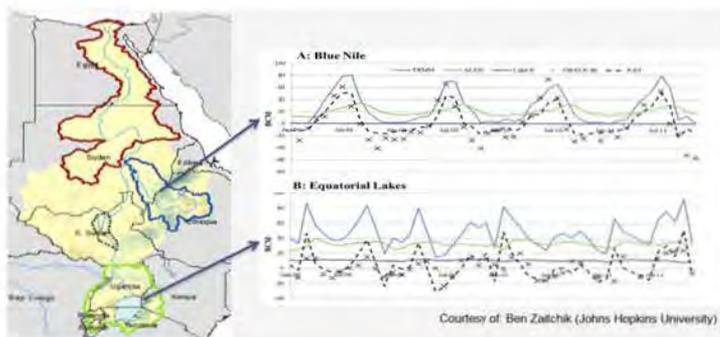


Figura 4.6. Equilibrio hidrológico en la cuenca del Nilo

- (c) Gestión de la irrigación usando la ET satelital, basada en el sistema "Terrestrial Observation and Prediction System" (TOPS) (Figura 4.7).



Figura 4.7. Sistema de administración de riego

- (d) Una herramienta de apoyo para decisiones de monitoreo de sequía en la nación Navajo, basada en TRMM y GPM. La nación Navajo ha sido impactada por sequías severas, falta de infraestructura hídrica doméstica, insuficiencia de recursos económicos. Aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la población carece de acceso a agua potable en casa. Se creó una base de "geodatos" de información climática histórica específica para esta área. Se combina mediciones de GRACE del almacenamiento del agua con datos meteorológicos y se generó mapas de porcentaje de aguas subterráneas y de la humedad del suelo desde el año 1948 hasta el presente (Figura 4.8).



Figura 4.8. Mapas de sequías en Navajo

- (e) Detección de lluvia extrema, humedad relativa del suelo e inundaciones. Se logró determinar información relevante sobre las Inundaciones en Carolina del Sur (EE.UU.) de 2015, basada en GPM y Global Flood Monitoring System (GFMS) (Figura 4.9).

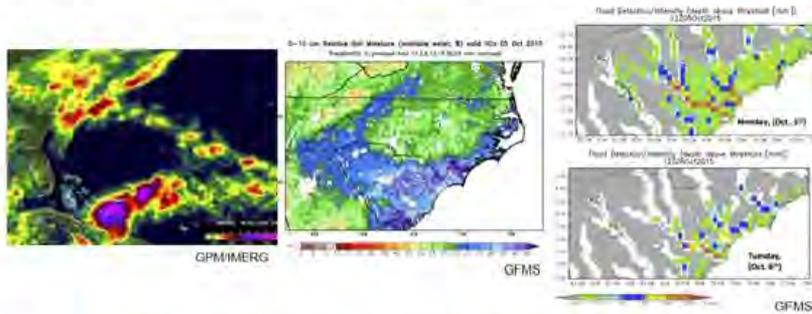


Figura 4.9. Mapa inundaciones en Carolina del Sur (EEUU)

- (f) Amazonas: satélites de la NASA captan la gravedad de las sequías. Un estudio financiado por la NASA, a partir de información satelital, mostró una importante reducción en el verdor de la cuenca del Amazonas, producida por la sequía récord de 2010 (Clarín.com, 2010). La sensibilidad de la selva amazónica a la sequía es un tema que preocupa a los científicos. Un equipo de profesionales estadounidenses y brasileños, liderado por el doctor Liang Xu, de la Universidad de Boston (EE.UU.), recoge en su trabajo conclusiones que señalan que, ante un mayor estrés de humedad derivado del calentamiento global, los bosques tropicales podrían ser reemplazados por sabanas.

4.3. Vehículos No Tripulados

4.3.1. Antecedentes Históricos

No despertamos ayer en este nuevo mundo presa de los drones o aeronaves pilotadas de forma remota. Hay una serie de hechos históricos y figuras relevantes que poco a poco fueron dando forma a lo que hoy conocemos como una nueva manera letal de matar a distancia y que además ha originado el crecimiento del drone o unidades no tripuladas como una tecnología potente a desarrollar también en el sector civil (eldrone,2016).

La idea del avión no tripulado es antigua. Aunque a menudo asociamos los drones con los robots militares de hoy, de una forma u otra, los aviones no tripulados se han utilizado durante décadas. Uno de los primeros usos registrados corresponde a los austriacos en julio de 1849, después de que se pusieran en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados montados con bombas en la ciudad de Venecia (Figura 4.10). Menos de dos décadas después de la Guerra Civil en EE.UU, fuerzas de la Confederación y de la Unión volaban globos para misiones de reconocimiento. En 1896 Samuel P. Langley desarrolló una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto que consiguieron trasladarse con éxito a lo largo del río Potomac, cerca de Washington DC (eldrone, 2016). La práctica de la vigilancia aérea más tarde surgió en la guerra hispanoamericana de 1898, cuando los militares de EE.UU. equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.



Figura 4.10. Globos aerostáticos no tripulados

Las aeronaves no tripuladas nunca hubieran sido posibles sin grandes avances tecnológicos como la radio. Nikola Tesla demostró por primera vez el mando a distancia o radio control de un vehículo, al final del siglo XIX. En un estanque en el Madison Square Garden de Nueva York en 1898, el inventor y showman controlaba a distancia un barco con una señal de radio. En 1916, la idea de las armas guiadas de forma remota despertó el interés del capitán Archibald M. Low, de la Royal Flying Corps en el Reino Unido que supervisó la construcción de una serie de aviones dirigidos por control remoto que fueron equipados con explosivos.

Durante la Primera Guerra Mundial el inventor del giroscopio, Elmer Ambrose Sperry, desarrolló una plataforma de aeronaves sin piloto con un dispositivo para lanzar torpedos con una catapulta. Una publicación del New York Times de 1926 apunta a que estas aeronaves eran guiadas con gran precisión y que después de una distancia predeterminada giraban y volaban hacia abajo en vertical, con una carga tal de TNT capaces de volar una población entera (Figura 4.11).



Figura 4.11. El avión automático Hewitt-Sperry

A lo largo de los años veinte, se utilizaron varios buques controlados a distancia para la formación de unidades de artillería. La década de 1930 vivió una oleada de interés militar en vehículos a control remoto, entre los cuales surgió la segunda generación "Bug".

Durante la Segunda Guerra Mundial el asunto se trató de forma diferente, a mediados de la década de 1940 se registró el desarrollo del GB-1 Glide: sistema de bombardeo aéreo ideado para eludir las defensas aéreas alemanas (Figura 4.12). A finales de 1946 un programa de la Fuerza Aérea de EE.UU. fue aprobado para desarrollar tres tipos de aviones no tripulados para su uso como objetivos de formación (Figura 4.13).



Figura 4.12. Avión bomba GB-1 Glide



Figura 4.13. El famoso Firebee de la compañía Ryan

En mayo de 1964, EE.UU. comenzó a considerar el envío de aviones no tripulados para reemplazar sus U-2 en misiones de espionaje (Figura 4.14). En 1970 se decidió que era el momento oportuno de los vehículos teledirigidos (RPVs). La Fuerza Aérea puso en marcha un programa que aumentara las capacidades de alcance y de vigilancia electrónica de las RPV. El programa consistió en la financiación de las compañías Boeing y Ryan para desarrollar aviones no tripulados resistentes que volaran a gran altitud (Figura 4.15).



Figura 4.14. Aeronave icónica en la guerra de Vietnam



Figura 4.15. Modelo Aquila RPV-drone

Únicamente con el profundo desarrollo en computación y sistemas de control electrónico durante los años 80 y 90, los drones del presente fueron tomando forma. Y no sería hasta finales de los 90 cuando las fuerzas aéreas americanas comenzaron a tratar los aspectos técnicos que llevaron a dotar a estos de drones de misiles (Figura 4.16).



Figura 4.16. F-4 Phantom

La CIA había empezado a volar drones en Afganistán desde el año 2000, pero fue solo a partir de los atentados del 11 setiembre que empezarían los vuelos de drones armados. Algunos se usaron a finales de 2001 contra los talibanes, y desde el año 2002 su empleo se dio sin que resultase un apoyo explícito al ejército (Figura 4.17).



Figura 4.17. MQ 9 Reaper Drone

4.3.2. Tipos de Vehículos No Tripulados

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como "drones", tiene el propósito de realizar mediciones en hidrología, implementando y adaptando la tecnología que ya existe. Así, al sobrevolar un río con el VANT instrumentado con distintos sensores, se pueden generar condiciones de contorno y solución inicial para modelos numéricos de flujo superficial, cuyo resultado final sería diversas mediciones como el caudal, pendiente hidráulica o la rugosidad del cauce. Esto permitirá generar información hidrológica en tiempo real, o en pos proceso (MILENIO, 2017). El término "dron", palabra adoptada en español como sinónimo del término inglés "drone" o zángano, se

empezó a utilizarse en el mercado militar para designar vehículos aéreos no tripulados; hoy en día la generalización del término engloba todo tipo de vehículos no tripulados y con el paso del tiempo estas plataformas han dado un enorme salto y se han empezado a extender en todo tipo de aplicaciones civiles (Dpto. Comunicación, 2015).

Los VANT denominados drones pueden ser aéreos, terrestres o acuáticos; en cualquiera de sus diversificaciones, estos equipos se encuentran en constante evolución y su aplicación se ha extendido a los diferentes campos del conocimiento, especialmente en las ciencias e ingenierías. En el caso específico de la hidrología —tema que abordamos en este libro— su uso es muy difundido y en nuestros días tienen múltiples aplicaciones. En definitiva, los avances en la electrónica, la robótica y otros campos son la base fundamental para el desarrollo de los VANT. Las aplicaciones se definen en función a la complejidad de los medios naturales que se quiere estudiar. Es importante señalar que estos equipos pueden usarse para monitoreo, detección de elementos, etc. (Figura 4.18), (Figura 4.19), (Figura 4.20)



Figura 4.18. Drones terrestres



Figura 4.19. Drones acuáticos



Figura 4.20. Drones híbridos

4.3.3. Clasificación de los drones

Los drones se pueden clasificar desde diferentes perspectivas: por el uso, por el tipo de control o por su forma.

En cuanto al uso, podemos encontrar (a) Drones militares: Suelen ir armados y con capacidad de bombardeo, aunque en algunas ocasiones se utilicen exclusivamente para espionaje. (b) Drones civiles: Son aquellos que no tienen uso militar y a su vez pueden dividirse en drones de uso comercial, para la venta de servicios como la fotogrametría, multimedia, etc.; drones para aficionados que los emplean como hobby; drones de uso gubernamental, para las fuerzas del Estado, bomberos, rescate, etc.

Por el tipo de control que utilizan, pueden ser: (a) Autónomo: El cual no necesita de un piloto humano que lo controle desde tierra, pues se guía por sus propios sistemas y sensores integrados. (b) Monitorizado: En este caso sí requiere de un técnico humano, cuya labor es controlar el feedback del dron e y proporcionar información; el dron dirige su propio plan de vuelo, sin embargo, el técnico, a pesar de no poder controlar los mandos directamente, sí puede decidir qué acción llevará a cabo. Este sistema es habitual en labores de agricultura de precisión y fotogrametría. (c) Supervisado: Un operador lo pilota, aunque este puede realizar algunas tareas autónomamente. (d) Preprogramado, sigue un plan de vuelo diseñado previamente y no tiene medios de cambiarlo para adaptarse a posibles cambios. (e) Controlado remotamente (R/C), es pilotado de modo directo por un técnico mediante una consola.

En cuanto a su forma, tenemos (a) Multirrotores (Figura 4.21), los más extendidos actualmente. Se componen de varios motores

independientes situados en los extremos del aparato, y, según el número de motores suelen clasificarse en tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. El uso de estos drones es mayor debido a su gran estabilidad, así como a la facilidad y cantidad de maniobras que consiguen realizar, además de poder volar estáticamente en el lugar que le indiquemos. No obstante, su desventaja es el gran consumo de energía que necesita para mantener el vuelo y su breve autonomía, la cual acostumbra durar entre los 15 y los 30 minutos. Estos drones son ideales en el sector audiovisual y en la inspección industrial.



Figura 4.21. Drone tipo multirrotor hexacóptero

(b) Helicópteros (Figura 4.22), su forma es la de un helicóptero convencional, pero de tamaño pequeño. Está compuesto de un solo motor principal, lo que le otorga gran capacidad de carga y autonomía. Existen modelos de combustión interna que pueden volar durante 1 hora sin necesidad de repostar combustible. No obstante, su complejidad tanto a nivel mecánico como de control los ha hecho menos accesibles y en razón a ello son los menos utilizados. Resultan ideales para fotogrametría, vigilancia o agricultura de precisión.



Figura 4.22. Drone Tipo Helicóptero

(c) Ala fija (Figura 4.23), son aquellos cuya fisonomía es similar a la de un aeroplano, está estructurado en base a un cuerpo principal unido a dos alas que le permiten planear y un rotor en cola, cuya propulsión puede ser eléctrica o de combustión. Sin duda es el más eficiente, aerodinámicamente hablando, y el que mayor autonomía de vuelo tiene. Por otro lado, existe el inconveniente de que son quienes menor carga pueden llevar, además, tienen menos agilidad de maniobras ya que no pueden permanecer inmóviles y necesitan una gran superficie para despegar o aterrizar. Sin embargo, su gran autonomía también lo convierte en un candidato ideal para las labores de fotogrametría y agricultura de precisión.



Figura 4.23. Drone Tipo Ala Fija

4.3.4. Drones en la Hidrología

Esta tecnología, desarrollada originalmente para actividades bélicas, ahora es utilizada en aplicaciones civiles y de apoyo a la gestión de los recursos hídricos. Los llamados drones, o vehículos aéreos no tripulados, han llegado a ser muy rentables en el suministro de información útil y actualizada sobre los recursos hídricos y su infraestructura.

Las imágenes de satélite se vienen utilizando en la gestión del agua durante décadas a fin de realizar una variedad de tareas, tales como los inventarios de uso de la tierra o la cartografía de daños después de inundaciones. En la actualidad, los gestores del agua utilizan esta información espacial para prevenir o cuantificar todo tipo de parámetros relacionados con el uso del agua, las sequías, las inundaciones, etc. Para muchas de estas aplicaciones, la teledetección satelital no resulta del todo óptima, pues a menudo se ve obstaculizada por las nubes, unas resoluciones espaciales reducidas y una escasa frecuencia de paso. Hoy

en día, la adquisición de los datos de campo está igualmente restringida por limitaciones de acceso, el elevado coste de las campañas o el instrumental de campo. Esto convierte a los pequeños aviones no tripulados que pueden volar de forma autónoma —conocidos como drones— en una herramienta muy útil, cuya facilidad para capturar datos de imagen permite que las operaciones se planifiquen de manera más flexible y rápida, lo cual garantiza que los productos de imagen estén disponibles en un tiempo relativamente prudente. Gracias a su baja altitud de vuelo, los drones pueden volar incluso bajo las nubes pesadas (iAgua, 2015); y, equipados con una cámara de alta resolución u otro tipo de sensores, cierran la brecha entre los laboriosos estudios de campo y la teledetección satelital. Su creciente éxito radica en el hecho de que las soluciones aportadas por la industria del sector se están convirtiendo en rentables. Además, la tecnología ha llegado a una etapa que posibilita que los usuarios puedan centrarse en las aplicaciones directas y en la extracción de información útil a partir de las imágenes.

En estos últimos años, los drones se usan para la inspección de diques en los Países Bajos; pues se sabe que, en países con superficie significativa por debajo del nivel del mar, pueden supervisar sus estructuras de control con inspección visual en intervalos regulares. Asimismo, en la agricultura de precisión es habitual el uso de drones con la finalidad de obtener información sobre oportunidad adecuada de riego, siembra, fertilización y cosecha. Se usan sensores para tomar datos espectrales y convertir información semiautomática en útil para el desarrollo de la agricultura. Así también, pueden promover una gestión óptima de las reservas naturales. Otra importante aplicación de los drones es el monitoreo de glaciares que juegan un papel crucial en la conservación de los recursos hídricos en el espacio y tiempo.

En términos generales, los drones pueden ser utilizados en los estudios del agua, detección y caracterización de contaminantes oceánicos y continentales, estudio de sedimentos en lagos y pantanos como en zonas costeras y oceánicas, estudios de corrientes marinas.

Es importante señalar las ventajas que tienen los drones respecto a los aparatos tripulados, siendo estas: (a) Reducción del riesgo en trabajos dentro de ecosistemas peligrosos. (b) Reducción tiempo-respuesta para acudir a lugares en emergencia. (c) Reducción de costos, puesto que usa energía renovable o recargable. (d) Contaminación nula o casi nula, dependiendo del tipo de energía que utilice el dron. (e) Facilidad de

acceso a lugares antes inaccesibles. (f) Capacidad de ofrecer a los expertos un panorama más amplio del lugar de emergencia.

4.4. Modelación de Sistemas Hidrológicos

4.4.1. Antecedentes Históricos

La historia de la modelización de los sistemas hidrológicos está vinculada a la aparición y evolución de las computadoras, a los sistemas operativos de fácil utilización, a los programas informáticos de aplicación y a las técnicas de adquisición de datos. La generalización del uso de computadoras y el desarrollo de métodos numéricos para fines informáticos han permitido a los hidrólogos realizar cálculos complejos y repetitivos con grandes cantidades de datos (Beven, 1989). La mayoría de las aplicaciones actuales de los modelos basados en la física los utilizan como modelos conceptuales concentrados en la escala de la grilla. Los documentos recientes sobre dichos modelos han malentendido y tergiversado estas limitaciones. Hay problemas hidrológicos prácticos que requieren predicciones basadas en la física.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Estrada et al., 2012).

Al pasar de los años se han utilizado los modelos globales o agregados que consideran la cuenca como una sola entidad, se asume una única entrada de lluvia (lluvia promedio), donde el caudal de salida se reproduce a partir de una dinámica global del sistema. Existen multitud de modelos globales, generalmente basados en el concepto del hidrograma unitario HU, el cual se puede integrar dentro de la teoría de sistemas que define a la cuenca como un sistema lineal, casuístico e invariante en el tiempo, donde solo una parte de lluvia efectiva produce

escorrentía, afectada por los procesos de evaporación, retención e infiltración que se recogen dentro de la función de pérdidas o función de producción (Corral, s. f.).

Esta forma de modelar tiene base física insuficiente, obvia el hecho de que parte de la escorrentía superficial puede infiltrarse al pasar por un cauce permeable, y subestima el componente subsuperficial del caudal. Además, la identificación del HU no es sencilla.

En los años 60, aparecieron unos modelos que podríamos denominar modelos agregados con base física. Estos consisten en una sucesión de elementos conceptuales interconectados que representan la respuesta de diferentes subsistemas del ciclo hidrológico (evaporación, escorrentía en medio saturado, escorrentía superficial en canal). No obstante, aun cuando el número de parámetros involucrados era muy grande, la descripción todavía resultaba demasiado elemental haciendo que no existiese mucha diferencia entre este tipo de modelos y los modelos conceptuales agregados (Beven, 1989).

A partir de los años 70, surgió un tipo de modelos con un planteamiento totalmente diferente a los de base física. Estos extraen la información que hay entre las entradas y las salidas del sistema, y la estructura del modelo se adapta a dichos datos. De ahí que se denominasen modelos de caja negra. Los primeros en aparecer fueron los modelos autorregresivos basados en el análisis de series temporales («Modelos Hidrológicos aplicados a la previsión y alerta de crecidas», s. f.). Actualmente existe una línea de trabajo sustentada en los modelos de redes neuronales artificiales, con la posibilidad de aprendizaje conforme haya un mayor número de datos que permitan la introducción de múltiples entradas (lluvia, temperatura, humedad, datos históricos de caudal). Si bien es cierto que han existido casos con buenos resultados, todavía queda un largo camino que nos revele toda la capacidad de este tipo de modelos.

Aún no resultan claros los criterios en que se puede basar la construcción de la estructura del modelo, lo cual dificulta su utilización en otras cuencas sin datos y la regionalización de los parámetros (Gómez & Rodríguez, 2012). Ahora bien, la tecnología actual permite conocer exhaustivamente ciertas variables con una buena resolución espacial, teniendo la posibilidad de tratar mucha información en un tiempo reducido y de manera operativa. Eso hace pensar que un modelo de este

tipo podrá ofrecer mejores resultados. Los denominados modelos distribuidos incorporan mejor aproximación de la distribución espacial de las diferentes variables y reproducen con mayor fidelidad los procesos que tienen lugar dentro de la cuenca. Los modelos distribuidos con base física describen con gran detalle los procesos hidrológicos de la cuenca, proponiendo la descripción de los fenómenos a escala fina (100-500m), donde se plantean las ecuaciones características de los diversos procesos e integran las salidas de los diferentes procesos de cada celda con las vecinas. Así derivan en modelos muy complejos que requieren una gran cantidad de información y, por lo menos hasta el momento, la calibración de un número enorme de parámetros en caso de no poder estimar todas las variables a partir de medidas de campo.

Las posibilidades actuales ofrecen una línea a medio camino entre los dos extremos. Los denominados modelos de parámetros distribuidos se caracterizan por la división de la cuenca en subunidades menores más homogéneas, donde se aplica un modelo global. La respuesta global de la cuenca se compone a partir de las contribuciones de las diferentes subunidades (Corral, s. f.). Una primera clasificación, en este tipo de modelos, podría darse por la manera de hacer la división en subunidades (Figura 4.24). Esta puede ser en subcuencas o en subunidades artificiales, siguiendo algún criterio establecido.



Figura 4.24. División de una cuenca y conceptualización de la red de drenaje en subcuencas (izquierda) y en subunidades artificiales (derecha).

4.4.2. Tipos de Modelos

Se puede clasificar los modelos hidrológicos desde distintos puntos de vista. De acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos

tenemos empíricos, conceptuales o basados en procesos; de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos pueden ser determinísticos o estocásticos; y, finalmente, de acuerdo con su representación espacial se clasifican en agrupados o distribuidos. Las aplicaciones de las herramientas de modelado cubren una amplia gama de áreas relacionadas con el agua tales como control de inundaciones, pronóstico de inundaciones, riego y drenaje, morfología de ríos, transporte de salinidad y sedimentos, hidráulica costera, gestión de puertos, costas y estuarios, evaluación de impacto ambiental, puente hidráulico e infraestructura relacionada («Institute of Water Modelling», 2018). En estos tres grupos es posible encontrar la gran cantidad de modelos que se usan en hidrología.

- (a) Los modelos por conceptualización de procesos básicos
- Si el modelo funciona como una relación calibrada entre entradas y salidas, recibe el nombre de modelo "de caja negra", empírico o de regresión. El cual se basa en relaciones entrada-salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales. Dentro de este tipo podemos mencionar al método Kostiaikov y Green Ampt (para estimación de infiltración), método racional y método de la curva número (generación de caudales), y, especialmente, los modelos estocásticos de series de tiempo.

 - En el extremo opuesto se encuentran los modelos "de caja blanca" (también llamados "de base física" o "teóricos"), en los que se conocen todos los procesos involucrados en la transformación. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular, haciendo innecesario el proceso de calibración; sin embargo, la falta de suficiente información relativa a los procesos que se desarrollan en el suelo, en el subsuelo y en la vegetación (entre otros), genera incertidumbre y la calibración se vuelve necesaria («Watershed Modelling», 2018). Asimismo, suele hablarse de modelos "conceptuales" o "de caja gris" cuando se trabaja con aquellos en los cuales se conocen algunos de los procesos internos del modelo. En general, los modelos conceptuales consideran leyes físicas en forma simplificada. (Figura 4.25)

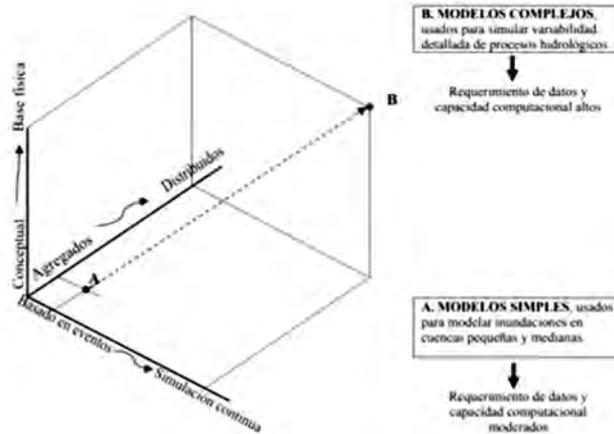


Figura 4.25. Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos

- (b) De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos
- Un modelo formal puede escribirse como una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original (Chong-Yu Xu, Kitterod & Ejigu Eregno, 2013). Estos expresan el comportamiento del sistema por un conjunto de ecuaciones. Si alguna de las variables es considerada como variable aleatoria (con una distribución de probabilidad), entonces el modelo es llamado "estocástico"; dicho término enfatiza la dependencia temporal de las variables hidrológicas relacionadas por el modelo. Si todas las variables se consideran libres de la variación aleatoria, de modo tal que ninguna tiene una distribución probabilística, entonces el modelo es considerado como determinístico. (Figura 4.26).

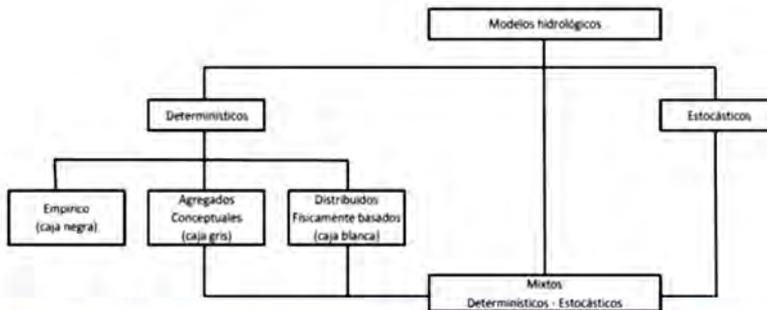


Figura 4.26. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos

- (c) De acuerdo a su representación espacial
- Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, como en los sub superficiales y subterráneos; afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representarla como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados "modelos agregados" o "agrupados".
 - A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, existe mayor probabilidad de que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de este tipo de modelo vaya perdiendo representatividad. Es así como a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. Estos son los llamados modelos "semi distribuidos" (Chong-yu Xu, 1999).
 - A pesar que los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aun así, representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados "grillas". Estos modelos son denominados "modelos distribuidos" y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes (Chávez-Jiménez et al, 2018).



Figura 4.27. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial.
a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido

5. BIBLIOGRAFÍA



Agricultura inca. (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2018, de <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/48003>

Albert Einstein, el genio del siglo XX. (s. f.). Recuperado 28 de julio de 2018, de <http://www.nationalgeographic.com.es/personajes/einstein>

ANA. (2018). Autoridad Nacional del Agua. Recuperado 31 de julio de 2018, de <http://www.ana.gob.pe/>

Ancajima, R. (2014, noviembre 16). Uso ancestral del agua en el Perú. Recuperado 24 de julio de 2018, de <https://hidraulicainca.com/acerca-de/uso-ancestral-del-agua-en-el-peru/>

Ancajima, R. (2018, junio 6). Quinto Camino Inca del Agua – Región Cusco. Recuperado 25 de julio de 2018, de <https://hidraulicainca.com/cusco/cusco-ciudad/quinto-camino-inca-del-agua-region-cusco/>

Angelakis, A. N., Mays, L. W., Koutsoyiannis, D., & Mamassis, N. (2012). Evolution of Water Supply Through the Millennia. IWA Publishing.

Aparicio, F. J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie (8. reimpr). México: Limusa Noriega Ed.

Bader, G. (1938). Ground Water. GEOPHYSICS, 3(2), 154-155. <https://doi.org/10.1190/1.1439479>

Bayden, M. (2016). Earth Science (First Edition). New York: Encyclopaedia Britannica.

Bernis, J. M. F. i. (2003). Cinco temas de hidrología e hidráulica. José María Franquet Bernis.

Bernoulli, D. (1738). Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum commentarii. Argentorati, Johann Reinhold Dulsecker 1738. Johann Reinhold Dulsecker. Recuperado de http://archive.org/details/bub_gb_3yRVAAAACAAJ

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105(1), 157-172.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90101-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90101-7)

Biografía de John Dalton. (2018). Recuperado 23 de julio de 2018, de <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/d/dalton.htm>

Boussinesq, J. (1842-1929) A. du texte. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes / par J. Boussinesq*. Recuperado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56673076>

Brown, G. (2003). Henry Darcy's Perfection of the Pitot Tube.
[https://doi.org/10.1061/40683\(2003\)3](https://doi.org/10.1061/40683(2003)3)

Brown, G. (2004). Jules Dupuit's Contributions in Water Resources.
[https://doi.org/10.1061/40738\(140\)14](https://doi.org/10.1061/40738(140)14)

Brown, G. O. (2002). Henry Darcy and the making of a law: HENRY DARCY AND THE MAKING OF A LAW. *Water Resources Research*, 38(7), 11-1-11-12.
<https://doi.org/10.1029/2001WR000727>

Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press. Bureau of Reclamation. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://www.usbr.gov/history/borhist.html>

Butzer, K. W. (1976). *Early Hydraulic Civilization in Egypt: A Study in Cultural Ecology*. Chicago: University of Chicago Press.

Campos, D. F. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Capra, F. (2008). *La ciencia de Leonardo la naturaleza profunda de la mente del gran genio del Renacimiento*. Barcelona: Anagrama.

Centro Peruano de Estudios Sociales. (s. f.). Recuperado 31 de julio de 2018, de <http://www.cepes.org.pe/>

Chanson, H. (2013). *Applied Hydrodynamics: An Introduction*. CRC Press.
Chávez-Jiménez, A., González-Zeas, D., Buguña, N. & Martínez, A. (2018). The Role of Regulation in Meeting Water Demands under Climate Change. *Water*

Resources Management, 32(12), 4031-4044.
<https://doi.org/10.1007/s11269-018-2036-z>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. New York: McGraw-Hill.

Clarín.com. (2010). Amazonas: satélites de la NASA captan la gravedad de las sequías. Recuperado 4 de agosto de 2018, de https://www.clarin.com/medio_ambiente/titulo_0_S1e4DDVaDmx.html

Coello, L. S. (2016, enero 13). Civilización Caral estaba adelantada 6 siglos a Europa y el resto de América | Conocer Ciencia. Recuperado 18 de julio de 2018, de <http://pepascientificas.blogspot.com/2016/01/civilizacion-caral-estaba-adelantada-6.html>

Corral, C. (s. f.). Tipos de modelos hidrológicos. Recuperado 9 de agosto de 2018, de http://www.crahi.upc.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=78%3Atipus-de-models-hidrologics&catid=36&Itemid=85&lang=es

Crawford, N. H. & Linsley, R. K. (1966). Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University.

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau... / par Henry Darcy... Recuperado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k624312>

Darcy, H. & Bazin, H. (1865). Recherches experimentales sur l'ecoulement de l'eau dans les canaux decouverts. Paris: Imprimerie imperiale.

Desaguliers, J. T. (1718). Edmé Marriotte. The motion of water and other fluids: being a treatise of hydrostaticks. Recuperado 20 de julio de 2018, de <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/library/QERNH1MN/pageimg&pn=5&mode=imagepath>

Desarrollo Comunal. (s. f.). Recuperado 31 de julio de 2018, de <http://www.cepes.org.pe/legisla/Legislacion%20anterior.htm>

Devia, G. K., Ganasri, B. P. & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>

Dirección de Hidrografía y Navegación. (s. f.). Recuperado 31 de julio de 2018, de <https://www.dhn.mil.pe/historia>

Dpto. Comunicación. (2015, julio 23). Aplicaciones hidrológicas para drones. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <http://drones.uv.es/aplicaciones-hidrologicas-para-drones/>

Dupuit, J. (1804-1866) A. du texte. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables: avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile (2e édition revue et considérablement augmentée) / par J. Dupuit...* Recuperado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62096061>

Eichmann, R. (2016, noviembre 14). El Nuevo Diario. Recuperado 10 de julio de 2018, de <http://www.elnuevodiario.com.ni/actualidad/410268>

Einstein, A. (1926). Die Ursache der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes.

El Comercio, R. (2014, mayo 7). El Perú preincaico es comparable a Egipto o Mesopotamia. Recuperado 12 de julio de 2018, de <https://elcomercio.pe/mundo/actualidad/peru-preincaico-comparable-egipto-mesopotamia-170485>

eldrone. (2016, mayo 29). Historia de los drones. Recuperado 4 de agosto de 2018, de <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>

Enciclopedia Británica. (s. f.). Edme Mariotte | French physicist. Recuperado 20 de julio de 2018, de <https://www.britannica.com/biography/Edme-Mariotte>

ESA. (2016, noviembre 15). Hidrología espacial. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://www.tiempo.com/ram/289782/hidrologia-espacial/>

Estrada Sifontes, V., Moya, P. & Miguel, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80. Recuperado de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382012000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es

FAO. (2018). Bases de datos y Softwares | Tierras y Aguas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado 30 de julio de 2018, de <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/es/>

FAO. (s. f.). Recuperado 30 de julio de 2018, de <http://www.fao.org/home/es/>

Fernández, C. (1971). Acueductos romanos. *Informes de la Construcción*, 23(227), 45-84. <https://doi.org/10.3989/ic.1971.v23.i227.3413>

Fernández, M. (2005). ¿Cuál fue el primer satélite artificial lanzado al Espacio? Recuperado 4 de agosto de 2018, de <https://www.muyhistoria.es/contemporanea/preguntas-respuestas/cual-fue-el-primer-satelite-artificial-lanzado-al-espacio-571507023797>

FIC-UNI. (2018). Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.uni.edu.pe/index.php/facultades/ingenieria-civil>

François, J. (1582?-1668?) A. du texte. (1653). *La science des eaux qui explique en quatre parties leur formation, communication, mouvemens & meslanges. Avec les arts de conduire les eaux, et mesurer la grandeur tant des eaux que des terres. Qui sont 1. De conduire toute sorte de fontaines. 2. De niveler toute sorte de pente. 3. De faire monter l'eau sur sa source. 4. De contretirer toute sorte de plans. 5. De connoistre toute hauteur verticale & longueur horizontale. 6. D'arpenter toute surface terrestre. 7. De compter tout nombre avec la plume & les jettons.* Par le P. Jean François, de la Compagnie de Jesus. Recuperado de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2033051>

Frazier, A. H. (1964). Daniel Farrand Henry's Cup Type «Telegraphic» River Current Meter. *Technology and Culture*, 5(4), 541. <https://doi.org/10.2307/3101218>

Frazier, A. H. (1967). *William Gunn Price and the Price current meters.* [Washington]: Smithsonian Press; [for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off. Recuperado de <https://trove.nla.gov.au/version/12507188>

Fuller, G. W. (1930). Allen Hazen: Died July 26, 1930. *Journal (American Water Works Association)*, 22(9), 1268-1270. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/41225591>

García, J. M. (2015). Desarrollo de métodos numérico-interpretativos para la realización de ensayos de bombeo, 234.

Gómez, R. P. & Rodríguez, J. B. M. (2012). El empleo del radar meteorológico en los sistemas de alerta temprana para la predicción de inundaciones, 269.

Gonçal, S. (2014). D'Alembert: de bastardo a líder de la ilustración. Linkgua digital.

GWP. (2018). Global Water Partnership - GWP. Recuperado 31 de julio de 2018, de <https://www.gwp.org/>

Hager, W. H. (2004). Jules Dupuit—Eminent Hydraulic Engineer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 843-848.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(843\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(843))

Hazen-Williams coefficient | This Day in Water History. (2013). Recuperado 26 de julio de 2018, de <https://thisdayinwaterhistory.wordpress.com/tag/hazen-williams-coefficient/>

Headquarters U.S. Army Corps of Engineers. (2001). Recuperado 24 de julio de 2018, de <https://www.usace.army.mil/About/History/Historical-Vignettes/Civil-Engineering/013-In-Common/>

Hertz, S. (2001). Emil Julius Gumbel. En *Statisticians of the Centuries* (pp. 406-410). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0179-0_87

Hofstede, R., Segarra, P., Mena V, Patricio & Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. (2003). *Los páramos del mundo*. Quito: UICN: Global Peatland Initiative : EcoCiencia.

Horton, R. E. (1940). AN APPROACH TOWARD A PHYSICAL INTERPRETATION OF INFILTRATION-CAPACITY. *SOIL SCIENCE SOCIETY PROCEEDINGS*. Recuperado de <https://dl.sciencesocieties.org/cache/publications/abstract-preview/sssaj-5-C-SS00500C0399-preview-1000.png>

Humphreys, A. A. (Andrew A. & Abbot, H. L. (1867). Report upon the physics and hydraulics of the Mississippi River; upon the protection of the alluvial region against overflow: and upon the deepening of the mouths: based upon surveys and investigations made under the acts of Congress directing the

topographical and hydrographical survey of the delta of the Mississippi River. Washington, Govt. print. off. Recuperado de <http://archive.org/details/reportuponphysi00abbogoog>

Hunt, B. (1985). The meaning of oscillations in unit hydrograph S-curves. *Hydrological Sciences Journal*, 30(3), 331-342. <https://doi.org/10.1080/02626668509490997>

Hutton, S. P. (1958). History of Hydraulics. *Journal of Fluid Mechanics*, 4(6), 655-657. <https://doi.org/10.1017/S0022112058210732>

Hydrologic Engineering Centre History. (s. f.). Recuperado 30 de julio de 2018, de <http://www.hec.usace.army.mil/about/history.aspx>

HydroSOLVE. (2018). Theis (1935)/Hantush (1964) Pumping Test Solution for Nonleaky Confined Aquifers. Recuperado 25 de julio de 2018, de <http://www.aqtesolv.com/theis.htm>

iAgua, redaccion. (2015, marzo 12). Drones que aportan soluciones en el sector del agua: desde la guerra hacia la paz hídrica [Text]. Recuperado 5 de agosto de 2018, de <https://www.iagua.es/blogs/johannes-hunink/drones-que-aportan-soluciones-sector-agua-guerra-paz-hidrica>

IAHS. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de http://www.history-of-hydrology.net/mediawiki/index.php?title=International_Association_of_Scientific_Hydrology#1922_-_1939:_First_participation_of_Hydrology_in_International_Scientific_Cooperation

Illy, J. (2012). *The Practical Einstein: Experiments, Patents, Inventions*. JHU Press.

Imhoff, J. & Donigian, A. (2005). History and Evolution of Watershed Modeling Derived from the Stanford Watershed Model. En D. Frevert & V. Singh (Eds.), *Watershed Models* (pp. 21-45). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420037432.ch2>

Institute of Water Modelling. (2018). Recuperado 9 de agosto de 2018, de <http://www.iwmbd.org/iwmwebsite/index.php>
International Association of hydrological Sciences [IAHS]. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://iahs.info/Commissions--W-Groups.do>

Inundaciones causan daños por segundo día consecutivo en Lima, Perú. (2017, marzo 18). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/lima-amanece-segundo-dia-consecutivo-inundaciones/>

Izard, M. (2017, marzo 31). U.S. Army Corps of Engineers still supporting U.S. Army missions after 200 years. Recuperado 29 de julio de 2018, de https://www.army.mil/article/185261/us_army_corps_of_engineers_still_supporting_us_army_missions_after_200_years

King, W. & Brater, F. (2018). Manual de hidráulica para la resolución de problemas de hidráulica. SERBIULA (sistema Librum 2.0).

Kircher, A. (1664). Athanasii Kircheri ... Mundus subterraneus, in XII libros digestus ... Amstelodami: Apud J. Janssonium et E. Weyerstraten.

La República, R. (2010, septiembre 15). Líneas de Nazca se hicieron para localizar agua. Recuperado 12 de julio de 2018, de <https://larepublica.pe/sociedad/484698-lineas-de-nazca-se-hicieron-para-localizar-agua>

Landsat Missions Timeline. (s. f.). Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>

Ley No 29338 - Ley de Recursos Hídricos. (2009, marzo 23). Recuperado 31 de julio de 2018, de <http://www.ana.gob.pe/publicaciones/ley-no-29338-ley-de-recursos-hidricos>

LNH-UNI. (2018). Laboratorio Nacional de Hidráulica. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.uni.edu.pe/index.php/uncategorised/143-laboratorio-nacional-de-hidraulica>

López, J. (2003). Breve Historia de la UNI. UNIPETRO ABC S.A.C.

Lucretius, T. & Humphries, R. (1969). Lucretius, the way things are: the De rerum natura of Titus Lucretius Carus. London; Bloomington: Indiana University Press.

Macho, M. (2014). Bernard Vonnegut: sembrando nubes. Recuperado 27 de julio de 2018, de <https://ztfnews.wordpress.com/2014/08/29/bernard-vonnegut-sembrando-nubes/>

Martínez, F. J. (1972). Aspecto histórico y evolutivo de las ideas acerca de las aguas subterráneas desde los tiempos más remotos hasta el nacimiento de la Ciencia Hidrogeológica. Recuperado 18 de julio de 2018, de <https://docplayer.es/17998950-F-j-martinez-gil-1972.html>

McClintock, J. (2000, diciembre 1). La solución de las líneas de Nasca | DiscoverMagazine.com. Recuperado 12 de julio de 2018, de <http://discovermagazine.com/2000/dec/featnasca>

McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W. (2003). The History of MODFLOW. *Groundwater*, 41(2), 280-283. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02591.x>

Meinzer, O. E. (1923). *Outline of Ground-Water Hydrology, With Definitions*, 77.

Mikhailov, G. K. (2005). Chapter 9 - Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica* (1738). En I. Grattan-Guinness, R. Cooke, L. Corry, P. Crépel, & N. Guicciardini (Eds.), *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940* (pp. 131-142). Amsterdam: Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-044450871-3/50090-5>

MILENIO. (2017, abril 26). Innovación y desarrollo de tecnología aplicada en hidrología. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <http://www.milenio.com/opinion/varios-autores/ug-tu-conecte-con-la-ciencia/innovacion-y-desarrollo-de-tecnologia-aplicada-en-hidrologia>

MINAGRI. (2008a, marzo 7). Hidrometeorología. Recuperado 31 de julio de 2018, de https://web.archive.org/web/20080307004358/http://www.minag.gob.pe/hidro_drenaje.shtml

MINAGRI. (2008b, marzo 18). Portal Agrario - Ministerio de Agricultura - Perú. Recuperado 31 de julio de 2018, de <https://web.archive.org/web/20080318162806/http://www.portalagrario.gob.pe:80/index.php>

MINAGRI. (2018). Ministerio de Agricultura y Riego - MINAGRI. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <https://www.gob.pe/minagri>

MINAM. (2018a). Gestión de la Calidad del Agua. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/gestion-de-la-calidad-del-agua/>

MINAM. (2018b). Ministerio del Ambiente - MINAM. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <https://www.gob.pe/minam>

Modelos Hidrológicos aplicados a la previsión y alerta de crecidas. (s. f.). Recuperado 9 de agosto de 2018, de http://www.crahi.upc.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=77%3Amodelos-hidrologicos-aplicats-a-la-previsio-i-alerta-de-crescudes&catid=36&Itemid=85&lang=es

Mulvaney, T. J. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4, 19-31. Recuperado de <https://ci.nii.ac.jp/naid/10025316839/>

Nace, R. L. (1970). *El agua y el hombre: panorama mundial*. París: Unesco.

Nace, R. L. (1974). Pierre Perrault: The Man and His Contribution to Modern Hydrology. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 10(4), 633-647. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1974.tb05623.x>

NASA. (2018a). Global Precipitation Measurement (GPM) Mission Overview | Precipitation Measurement Missions. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://pmm.nasa.gov/GPM>

NASA. (2018b). NASA Earth Observatory - Home. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://earthobservatory.nasa.gov/>

Natura, F. (2013). El canal de abastecimiento de agua llegando a la ciudad a través del sector agrícola, y encima un amplio canal de drenaje, Machu Picchu, Cuzco, Perú. Recuperado 27 de julio de 2018, de <https://formentinatura.wordpress.com/2013/10/22/machu-picchu-iii-ser-y-razon-de-machu-picchu-essence-and-motivation-of-machu-picchu/el-canal-de-abastecimiento-de-agua-llegando-a-la-ciudad-a-traves-del-sector-agricola-y-encima-un-amplio-canal-de-drenaje-machu-picchu-cuzco-peru-formenti-009/>

NRC, Ad Hoc Committee on International Programs in Atmospheric Sciences and Hydrology. (1963). *An Outline of International Programs in Hydrology: A Report to the Geophysics Research Board, National Academy of Sciences-National Research Council*. National Academies.

NRCS. (s. f.). Recuperado 30 de julio de 2018, de <http://www.hec.usace.army.mil/>

NRCS Drainage Page. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/?&cid=nrcs143_010853

NRCS Water Management. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/water/manage/>

Ochoa, J. F. (s. f.). Historia mecánica de fluidos Siglo XIX. Recuperado 24 de julio de 2018, de <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/historia/historiamcafluidossigloxix/historiamcasxix.html>

Olarte, E. G. de. (1999). Andenes y desarrollo sustentable. Instituto de Estudios peruanos.

Origin and development of the American Geophysical Union, 1919–1952. (1954). *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 35(1), 5-46. <https://doi.org/10.1029/TR035i001p00005>

Palacios, J., Arana, M., Torres, J. & Patruco, S. (2016). Historia ambiental del Perú. Siglos XVIII y XIX. Recuperado de <http://sinia.minam.gob.pe/documentos/historia-ambiental-peru-siglos-xviii-xix>

Palissy, B. (1580). Discours admirables de la nature des eaux et fontaines tant naturelles qu'artificielles, des metaux, des sels & salines, des pierres, des terres, du feu & des emaux ... plus vn traité de la Marne ... chez Martin le leune.

Pedroza, E., Ortíz, J. & Martínez, F. (2007). Historia del Teorema de Bernoulli. *Acta Universitaria*, 17(1), 39-45. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41617103>

People | NRCS. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/people/>

Perrault, C. (1761). Compendio de los diez libros de Arquitectura de Vitruvio. Madrid: Imprenta de D. Gabriel Ramirez. Recuperado de <http://www.anarkasis.net/Vitruvio/index.htm#1990>

Ponce, V. M. (1993, 2018). Facetas de la hidrología, tipos de hidrología. Recuperado 30 de junio de 2018, de <http://facetas.sdsu.edu/>

Ponce, V. M. (2005). Manning, Manning formula, history of the Manning formula, Fadi Khoury, hydraulics, hydrology. Recuperado 23 de julio de 2018, de <http://manning.sdsu.edu/>

Ponce, V. M. (2009). General dimensionless unit hydrograph, unit hydrograph theory, cascade of linear reservoirs, courant number, basin simulation, watershed simulation, flood calculation. Recuperado 25 de julio de 2018, de https://ponce.sdsu.edu/general_dimensionless_unit_hydrograph.html

Ponce, V. M. (2015). FHC, Cap. 05, Lectura, Fundamentos de Hidráulica de Canales, Capítulo 05, Flujo Uniforme, San Diego State University, 2015. Recuperado 21 de julio de 2018, de https://ponce.sdsu.edu/canales/hidraulica_de_canales_05.html#chezy

Ponce, V. M. (2018). Gumbel, Emil Julius Gumbel, hydraulics, hydrology. Recuperado 26 de julio de 2018, de https://ponce.sdsu.edu/gumbel_history.html

Postel, S. (s. f.). Egypt's Nile Valley Basin Irrigation. Recuperado 11 de julio de 2018, de <http://www.waterhistory.org/histories/nile/>

PUCP. (2018). Pontificia Universidad Católica del Perú | PUCP. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.pucp.edu.pe/>

PUCP-Historia. (2018). Historia PUCP. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://ira.pucp.edu.pe/el-instituto/historia/>

PUCP-LH. (2018). PUCP | Laboratorio de Hidráulica (Pabellón C): Descubre PUCP. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://descubre.pucp.edu.pe/poi/lab003>

Redacción. (2017, marzo 16). Perú: Dramático momento vivió mujer cuando fue arrastrada por huaico. Recuperado 29 de julio de 2018, de <http://aldiamedia.com/2017/03/16/peru-dramatico-momento-vivio-mujer-cuando-fue-arrastrada-por-huaico/>

Riaño, F. (2014). El nacimiento de la Hidrodinámica Teórica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 35(2), 66-78. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382014000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=en

Riaño, F. (2016). La hidráulica experimental durante el siglo XVIII en Francia. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(3), 113-126. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382016000300009&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>

Rippl, W. (1883). The capacity of storage-reservoirs for water-supply. (including plate). *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 71(1883), 270-278. <https://doi.org/10.1680/imotp.1883.21797>

Rocha, A. (2010). ALBERT EINSTEIN Y EL ORIGEN DE LOS MEANDROS, 14.

Ross, W. D. (1923). *ARISTÓTELES (Segunda)*. Buenos Aires: Editorial Charcas. Buenos Aires.

Rouse, H. & Ince, S. (1958). History of Hydraulics. *Journal of Fluid Mechanics*, 4(6), 655-657. <https://doi.org/10.1017/S0022112058210732>

Saldarriaga, J. G. (2002). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá, D.C.: McGraw-Hill.

Sánchez, F. J. (2017). Hidrología-Hidrogeología. Recuperado 18 de julio de 2018, de <http://hidrologia.usa.es/temas.html>

Sánchez, R., Mora, C., Barbosa, L. & Ensastiga, L. (2013). Tratado epistemológico del Principio de Bernoulli para estudiantes de ingeniería. *Revista Latinoamericana de Física Educativa ISSN 1870-9095*, 7, 560-567.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2018). En Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperado de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Servicio_Nacional_de_Meteorolog%C3%ADa_e_Hidrolog%C3%ADa_del_Per%C3%BA&oldid=109410295

Shifter, G., Manuel e Isaac. (2013a). *La huella del agua*. Fondo de Cultura Económica.

Shifter, G., Manuel e Isaac. (2013b). *La huella del agua*. Fondo de Cultura Económica.

Simmons, C. T. (2008). Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy. *Hydrogeology Journal*, 16(6).
<https://doi.org/10.1007/s10040-008-0304-3>

Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>

Soil Survey | NRCS Soils. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/soils/survey/?cid=nrcs142p2_053369

Solis, R. S., Haas, J. & Creamer, W. (2001). Dating Caral, a Preceramic Site in the Supe Valley on the Central Coast of Peru. *Science*, 292(5517), 723-726.
<https://doi.org/10.1126/science.1059519>

Sparavigna, A. C. (2013, agosto 18). Waru Waru – Puno. Recuperado 24 de julio de 2018, de <https://hidraulicainca.com/puno/waru-waru-puno/>

Staff Agua & Ambiente. (2015, septiembre 7). Los mayas y su mitología hidrológica. Recuperado 18 de julio de 2018, de <https://aguayambiente.com/2015/09/06/mayas-mitologia-hidrologica/>

Sutera, S. P. & Skalak, R. (1993). The History of Poiseuille's Law. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1), 1-20.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.000245>

Terstriep, M. L. & Stall, J. B. (1974). The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS, 94.

Theis, C. V. (1952). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Am. Geophys. Union Trans.*, 16, 519-524.

Tiffany, J. B. (1968). History of the Waterways Experiment Station - Histories - USACE Digital Library. Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://cdm16021.contentdm.oclc.org/digital/collection/p16021coll4/id/84>

Tolman, C. F. (1937). Ground Water. Recuperado 20 de julio de 2018, de <http://www.waterwired.org/2012/07/1937-cf-tolman-and-the-new-science-of-ground-water-hydrology.html>

Torres, A. & Sandoval, S. (2015). Avances en hidrología urbana | Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado 29 de julio de 2018, de <http://www.javeriana.edu.co/editorial/libros/avances-hidrologia-urbana>

Truesdell, C. (1984). Daniel Bernoulli's «Hydrodynamica» (1960). En *An Idiot's Fugitive Essays on Science* (pp. 209-211). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8185-3_25

Truesdell, C. A. (1975). *Ensayos de historia de la mecánica*. Madrid: Tecnos.

UNALM. (2018). La Molina - Reseña Histórica. Recuperado 1 de agosto de 2018, de http://www.lamolina.edu.pe/portada/html/acerca/res_historica.html

UNESCO. (2014). Centro del Patrimonio Mundial. Recuperado 10 de julio de 2018, de <https://whc.unesco.org/es/list/1506>

UNESCO. (s. f.). Recuperado 31 de julio de 2018, de <https://es.unesco.org/>

UNESCO Hidrología. (2015, diciembre 8). Recuperado 31 de julio de 2018, de <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia>

UNI. (2010). Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1185226>

United States Geological Survey. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://govinfo.library.unt.edu/npr/library/status/mission/musgs.htm>

UNMSM. (2011, agosto 16). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <https://web.archive.org/web/20110816181611/http://www.unmsm.edu.pe:80/?url=inicio-historia>

UNMSM, O. de P. W. (2013, de mayo). Moderna infraestructura para EAP de Ingeniería Mecánica de Fluidos | Noticias | Universidad Nacional Mayor de San Marcos | UNMSM. Recuperado 1 de agosto de 2018, de <http://www.unmsm.edu.pe/noticias/ver/2598>

US Department of Commerce, N. (s. f.). National Weather Service. Recuperado 29 de julio de 2018, de <https://www.weather.gov/>

US EPA, O. (2014a, mayo 21). Storm Water Management Model (SWMM) [Data and Tools]. Recuperado 30 de julio de 2018, de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

US EPA, O. (2014b, junio 24). EPANET [Data and Tools]. Recuperado 30 de julio de 2018, de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

USGS. (2018). USGS Landsat Ground Stations | Misiones Landsat. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://landsat.usgs.gov/usgs-landsat-ground-stations>

Verruijt, A. (1968). A note on the Ghyben-Herzberg formula. <http://dx.doi.org/10.1080/02626666809493624>

Watershed Modelling. (2018). Recuperado 9 de agosto de 2018, de <http://www.hyd.ifu.ethz.ch/studium/master-studies/watershed-modelling.html>

Welcome to the Illinois State Water Survey. (2018). Recuperado 30 de julio de 2018, de <https://www.isws.illinois.edu/>

WMO. (2012). International Glossary of Hydrology (p. 469).

WMO. (2018). World Meteorological Organization. Recuperado 30 de julio de 2018, de http://www.wmo.int/pages/index_es.html

Wu, D. (2015, octubre 29). El Gran Yu frenó las peores inundaciones de la antigua China. Recuperado 10 de julio de 2018, de <http://es.clearharmony.net/articles/a112701-El-Gran-Yu-freno-las-peores-inundaciones-de-la-antigua-China.html>

Wu, K.-C. (1982). *The Chinese heritage* (1st ed). New York: Crown.

Xu, Chong-yu. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 23(2), 229-249. <https://doi.org/10.1177/030913339902300204>

Xu, Chong-Yu, Kitterod, N. & Ejigu Eregno, F. (2013). Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(3), 344-365. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2012-0024>

Yen, B. C. (1992). Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula. Water Resources Publication.

Zaitchik, B. (2013). SVS: The Distributed Water Balance of the Nile Basin. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://svs.gsfc.nasa.gov/4044>

Zaitchik, B. (2018). Special Seminar: Dr. Ben Zaitchik- Causes and Consequences of Climate Variability in the Nile Basin –. Recuperado 3 de agosto de 2018, de <https://www.globalchange.vt.edu/2017/01/24/special-seminar-dr-ben-zaitchik-causes-and-consequences-of-climate-variability-in-the-nile-basin/>

*La presente obra se terminó de imprimir
en Tacna a los 28 días del mes de junio 2019
Tiraje de 200 ejemplares*



ISBN: 978-612-46338-8-1



9 786124 633881