

**INCORPORACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA CREACIÓN DE  
MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA  
POTABLE**

**FREDY ALEJANDRO MUÑOZ FIQUE**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2020**

**INCORPORACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA CREACIÓN DE  
MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA  
POTABLE**

**FREDY ALEJANDRO MUÑOZ FIQUE**

**DIRECTOR:**

**JUAN PABLO RODRIGUEZ RINCON**

**Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D. C., octubre de 2020.

## AGRADECIMIENTOS:

Debo agradecer de manera especial y sincera al Profesor Juan Pablo Rodríguez Rincón por aceptarme para realizar esta tesis Monográfica bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable. La orientación ha sido la clave para la buena realización de este documento, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación. Muchas gracias Profesor y espero verlo pronto.

También debo agradecer a mi madre Flor Ángela Fique Salas quien fue el pilar de mi educación, y sin ella esto no hubiera sido posible, muchas gracias por creer en mí y darme el apoyo necesario a lo largo de mi carrera universitaria, valoro tu lucha por criarnos de la mejor manera posible. Espero algún día retribuir todo lo que me has dado.

## DEDICATORIA:

Dedico esta tesis a mis amigos Julio Cesar y Tatiana Monsalve quienes fueron un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía este documento.

A mi madre quien me apoyo todo el tiempo.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme, aun con los tropiezos a lo largo de mi carrera, ellos continuaron depositando su esperanza en mí.

A los jurados quienes estudiaron y analizaron cada uno de los parámetros de mi documento y la aprobaron. A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta monografía.

Para ellos es esta dedicatoria, pues es a ellos es a quienes les debo por su apoyo incondicional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2. OBJETIVO.....	18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. DESARROLLO .....	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA .....	19
2.2. TÉCNICAS PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	26
2.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS.....	39
2.4. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS EN ABASTECIMIENTO DE AGUAS .....	42
2.4.1. Modelación dinámica de abastecimiento. ....	50
2.4.2. Sistemas de abastecimiento: desalinización. ....	51
2.5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	52
2.6. ECUACIÓN DE BERNOULLI .....	56
2.7. AVANCES TECNOLÓGICOS PARA LA MEJORA EN LA OBTENCIÓN DE DATOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.....	62
2.7.1 Inteligencia Artificial .....	66
2.7.2. Internet de las cosas (IdC) y Big Data.....	68
2.7.3. Blockchain.....	71
2.7.4. Sistemas de Teledetección.....	73
2.7.5. Realidad virtual y aumentada. ....	76
3. CONCLUSIONES .....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tipos de modelos hidrodinámicos.....	35

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clasificación de los modelos hidrodinámicos.....	34
Figura 2. Niveles del Río Magdalena en Puerto Salgar (Cundinamarca).....	37
Figura 3. Tubo de corriente para ecuación de continuidad.....	54
Figura 4. Esquema de un flujo de fluido .....	56
Figura 5. Esquema del tubo de Venturi .....	59
Figura 6. Esquema de un atomizador .....	60
Figura 7. Flujo de aire en un corte transversal de un ala de avión .....	61

## RESUMEN

En este trabajo se analiza la forma en que se incorporan las nuevas tecnologías en la creación de modelos hidrodinámicos para el abastecimiento de agua potable. Para ello, se identifican las diferentes aplicaciones de los modelos hidrodinámicos en la administración del agua potable, se analizan experiencias internacionales relacionadas con el empleo de nuevas tecnologías para la creación de modelos hidrodinámicos y se describen modelos hidrodinámicos basados en las nuevas tecnologías que puedan emplearse para el abastecimiento de agua potable en Colombia.

El trabajo se encuentra organizado en tres capítulos; en el primero se precisa el problema de investigación y se definen los objetivos a desarrollar. El segundo capítulo contiene el desarrollo de los objetivos, para lo cual se divide en siete subcapítulos, cada uno con temas específicos relacionados con los objetivos e incluye aspectos como la evolución de los modelos hidráulicos, las técnicas para su modelación, los métodos de análisis de esos modelos, la evolución de los modelos de abastecimiento de agua, las principales ecuaciones empleadas y los avances tecnológicos que en la actualidad han acelerado el desarrollo y la aplicación de esos modelos. En el tercer capítulo se muestran las conclusiones del trabajo.

**Palabras claves:** modelos, hidráulica, tecnología, agua potable.

## **ABSTRACT**

This work analyzes the way in which new technologies are incorporated in the creation of hydrodynamic models for the supply of drinking water. For this, the different applications of hydrodynamic models in the administration of drinking water are identified, international experiences related to the use of new technologies for the creation of hydrodynamic models are analyzed, and hydrodynamic models based on new technologies that can be used to the supply of drinking water in Colombia.

The work is organized in three chapters; in the first one, the research problem is specified and the objectives to be developed are defined. The second chapter contains the development of the objectives, for which it is divided into seven sub-chapters, each one with specific topics related to the objectives and includes aspects such as the evolution of hydraulic models, the techniques for their modeling, the methods of analysis of these models, the evolution of the water supply models, the main equations used and the technological advances that today have accelerated the development and application of these models. The third chapter shows the conclusions of the work.

**Key words:** models, hydraulics, technology, drinking water.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de monografía es un esfuerzo por mostrar la incorporación de las nuevas tecnologías en la creación de modelos hidrodinámicos para el abastecimiento de agua potable, para ello aborda la exploración del conocimiento disponible en relación con los modelos de hidrodinámicos mediados por la intervención de tecnologías modernas.

De acuerdo con Cavalli (2017) el derecho de aguas conforma aquellas reglas obligatorias que tiene en cuenta el aspecto social y que se encargan de reglamentar el vínculo que realizan las personas con el agua, en las múltiples formas como se expresa el ciclo hidrológico y que tiene que ver con el medio ambiente. Balaguer y Navarro (2016) registran que las Naciones Unidas reconocen el agua potable como un recurso esencial e imprescindible para la vida, por lo que adquiere el carácter de Derecho universal, indivisible e imprescindible. Entre los denominados Derechos de “tercera generación” vinculados con nuevas necesidades surgidas como consecuencia de la evolución de la sociedad, y que son reclamados internacionalmente por distintos actores y movimientos sociales. Esta reivindicación se articula en la Declaración de Derechos Humanos Emergentes a partir del “derecho a la existencia en condiciones de dignidad”.

Sin embargo, Para que se materialice se requiere que, desde la perspectiva de la ingeniería, existan los mecanismos técnicos necesarios y suficientes para controlar el comportamiento del agua en el planeta y especialmente en el caso del agua potable. Siendo este un recurso esencial para la supervivencia humana.

## **1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El suministro de agua confiable y de calidad es vital para el desarrollo de cualquier comunidad en el mundo, es esencial para que las poblaciones funcionen y prosperen. No es solamente consumo; en general es fundamental para casi todos los segmentos de la vida urbana. El estudio de la hidráulica para el abastecimiento se ha centrado principalmente en el desarrollo de redes de distribución y explotación de nuevas fuentes de abastecimiento; la reutilización y el manejo sustentable del recurso hídrico, como el tratamiento de agua. Todo en pro de afrontar las presiones de la urbanización y el cambio climático. Por lo tanto, es fundamental identificar los elementos necesarios para la transición del paradigma tradicional de gestión del agua actual a uno que aborde los problemas actuales y futuros (U.S. Water Alliance, 2012).

Existe una demanda cada vez mayor de agua que surge por el dramático crecimiento de la población, así como la industrialización y en general la mejora de los niveles de vida. Principalmente se generan desequilibrios entre el suministro y la demanda de agua (Saif & Almansoori, 2014), problemas de gestión de aguas residuales (Maryam & Büyükgüngör, 2017), contaminación del suelo y el agua (Kirschke, et al., 2017).

La utilización de modelo matemáticos como herramientas de diseño y seguimiento de sistemas hidráulicos, hace necesario realizar procesos de validación que reflejen la capacidad que tienen de representar las condiciones reales del sistema ante condiciones conocidas (Carmenates, et al., 2016)

Para la calibración de los modelos matemáticos, el monitoreo y seguimiento de los sistemas hidráulicos es necesario realizar procesos de captura y procesamiento de variables hidráulicas como, caudal, velocidad, nivel de la lámina de agua, a través de equipos especializados.

El efecto del cambio climático es evidente a nivel global, no siendo ajeno Colombia, donde los cambios de las condiciones climáticas, particularmente temperatura y precipitación son marcados, presentándose fenómenos extremos como sequías, inundaciones, avalanchas, escasez de alimentos, agua, energía, degradación ambiental, que afectan directamente la población, los ecosistemas y los sectores socioeconómicos del país (López & Hernández, 2017).

Los efectos del cambio climático combinado con los cambios en uso y cobertura del suelo, reducen la capacidad de infiltración del suelo, aumentando la escorrentía superficial y por ende el riesgo de inundación, es necesario implementar sistemas de alertas tempranas que permitan reducir el riesgo de inundaciones, a través de sistemas de monitoreo constante que permiten en tiempo real monitorear el comportamiento de los principales cuerpos de agua.

El monitoreo constante de los cuerpos de agua, además de permitir prevenir inundaciones y contrarrestar los efectos asociados a las mismas, requieren de aplicaciones importantes en el área de sistemas ingenieriles, como es el diseño de sistemas de acueducto, sistemas de alcantarillado, plantas de tratamientos, proyectos hidroeléctricos y en general sistemas hidráulicos.

En la práctica ingenieril, los sistemas hidráulicos son diseñados y estudiados a través de modelos matemáticos los cuales han alcanzado gran aceptación, convirtiéndose en herramientas casi indispensables para el diseño, gestión y explotación de estos. Este logro ha sido posible fundamentalmente por la capacidad de los modelos matemáticos de reproducir con adecuada precisión la dinámica de los sistemas hidráulicos (López & Hernández, 2017).

Sin embargo, para que un modelo matemático pueda ser utilizado con confianza para la evaluación de los sistemas hidráulicos, este debe ser previamente calibrado y verificado. En este sentido, el procedimiento de calibración consiste básicamente en ajustar los parámetros del modelo que permitan que los resultados obtenidos por el modelo correspondan con los datos medidos en condiciones reales del sistema.

Esa demanda de estudios para la modelación hídrica a nivel mundial se ha visto impulsada en los años recientes por el avance de las tecnologías de la información y las comunicaciones, que han facilitado la adopción de aplicaciones que facilitan la creación de esos modelos mediante la incorporación de información digitalizada como mapas con geoposicionamiento satelital, modelos matemáticos que toman datos en tiempo real y otras alternativas que permiten cada vez mayor confiabilidad y rapidez.

Ante la demanda acelerada de alimentos que se ha presentado como consecuencia del crecimiento de la población, diferentes organismos e instituciones internacionales han tomado parte en el debate; así, en 1992 se realizó la Cumbre de la Tierra para tratar los temas relacionados al desarrollo sostenible, liderado por la ONU; en ella los dirigentes del mundo se comprometieron a adoptar para sus países un programa llamado Agenda 21, con el fin de alcanzar el crecimiento en las diferentes regiones, en él se trataron temas relacionados con el

manejo de los recursos hídricos, de agricultura y desechos, salud, vivienda y contaminación del aire y el contenido transversal, el agua. (Rubio, et al., 2019)

No obstante, la problemática de este recurso radica en la escasez de agua dulce, su destrucción gradual y su creciente contaminación, así como la introducción continua de actividades incongruentes en las regiones del mundo, debido a la carencia en la planificación y ordenación de los recursos hídricos, a lo que se suma el cambio climático, la contaminación atmosférica y el derroche desmedido de este preciado líquido (Restrepo & Aguilar, 2019).

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS) el agua salobre y fácilmente accesible es importante para la salud pública, ya sea que se utilice para beber, para uso doméstico, para producir alimentos o para fines recreativos (OMS, 2019). A pesar de ello, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, más de 1000 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua potable y unos 2600 millones de personas no gozan de servicios sanitarios mínimos (PNUD, 2018).

En el país la situación del agua es similar; según el reporte del Estudio Nacional del Agua 2018 “Colombia cuenta con una gran riqueza hídrica: 5% de los recursos hídricos mundiales” (ENA, 2018), lo que lo ubica como país rico en esta sustancia líquida. Sin embargo, muchas personas en el país y especialmente si se ubican en regiones apartadas o marginadas, no tienen acceso a este recurso, debido a que para adquirirlo deben competir con otros actores que tienen mayor capacidad económica y que pueden emplearla incluso para usos suntuarios.

La situación descrita muestra que en el país el tema de la modelación hídrica es cada vez más importante, dado que no basta simplemente con realizar modelaciones hídricas en diferentes cuerpos de agua sino de hacerlo con las mejores alternativas técnicas disponibles, de manera que los pronósticos que se obtengan sean cada vez más confiables y se puedan realizar con el menor esfuerzo y con la rapidez que ofrecen las tecnologías que ya se encuentra disponible en países más desarrollados.

Colombia es un país con vocación prioritariamente agrícola, por lo que los cultivadores necesitan contar con información confiable del comportamiento futuro de los cuerpos de agua, es decir, las quebradas, ríos, lagunas y demás fuentes para el riego de sus plantaciones. Adicionalmente, también es un país subdesarrollado, por lo que muchas de sus obras de infraestructura como carreteras, vías férreas, aeropuertos, puertos fluviales y marítimos, entre otros, están todavía en fase de construcción. Ese tipo de proyectos también son usuarios de la información que generan los estudios de modelación hídrica.

Lo anterior implica que, tanto desde el punto de vista de la economía como de la ingeniería, la modelación hídrica se encuentra estrechamente vinculada a la realidad nacional colombiana, y es precisamente esa situación la que motiva la realización del presente trabajo. Sin embargo, dado que existen diversas aplicaciones de los modelos hidrodinámicos, el énfasis del trabajo se hará en aquellos orientados al abastecimiento de agua potable.

Se busca seleccionar publicaciones científicas y académicas que se hayan producido desde diferentes países sobre la modelación hídrica y que utilicen tecnologías avanzadas; ese proceso de búsqueda y selección de la información disponible tanto en idioma español como inglés permitirá la construcción del estado del arte sobre el tema, y de esa forma contribuir a

que se facilite en el futuro la incorporación de ese tipo de tecnologías en un asunto tan importante para diferentes tipos de proyectos que involucran la ingeniería civil y en los que el comportamiento de los cuerpos de agua resulta ser una variable crítica.

Dicha selección se empieza por una búsqueda bibliográfica que significa una recopilación sistemática de la información publicada relacionada con el tema, Énfasis en sistemática Por ello, es importante dirigir la búsqueda bibliográfica hacia los artículos o libros más relevantes. Para esta tarea se utilizaron las diferentes plataformas que brinda la universidad virtual resaltándose la base de datos Scopus Por supuesto, cuando se inicia un proceso de búsqueda no se sabe qué material es el más relevante; Por tanto, se debe delimitar la búsqueda todo lo posible para ello se utilizó la herramienta de búsqueda la cual establece cuales son las palabras claves para encontrar dichos documentos, En este caso las palabras fueron: Modelación hidráulica, Modelación hídrica, Sistemas de Abastecimiento, Software de modelamiento hidrodinámico, herramientas de análisis de datos, Etc.

Además de utilizar estas plataformas también se optó por realizar un procedimiento escalonado con cada uno de los artículos y tesis recolectados es decir que a cada documento se realizaba un análisis de su bibliografía y de allí se extraían dos aportes bibliográficos y así sucesivamente con este se garantizó que cada uno de los aportes fuera confiable y verídico.

Continuando con el tema central la red de suministro de agua potable abastece a los residentes, que es la garantía básica para la vida. Sin embargo, debido a la aceleración de la urbanización, las redes de tuberías de suministro de agua a menudo carecen de planificación. El daño de la tubería tiene un gran impacto en la calidad del agua y la hidráulica del sistema de distribución de agua, es probable que las fugas causen contaminación secundaria de las

fuentes de agua y peligros para la seguridad del agua. En estas situaciones, los modelos hidrodinámicos también juegan un papel determinante en la estimación del comportamiento de las redes.

## **1.2. OBJETIVO**

Analizar la forma en que se incorporan las nuevas tecnologías en la creación de modelos hidrodinámicos para el abastecimiento de agua potable.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Identificar las diferentes aplicaciones de los modelos hidrodinámicos en la administración del agua potable.
2. Analizar las experiencias internacionales relacionadas con el empleo de nuevas tecnologías para la creación de modelos hidrodinámicos.
3. Describir modelos hidrodinámicos basados en las nuevas tecnologías que puedan emplearse para el abastecimiento de agua potable en Colombia.

## **2. DESARROLLO**

### **2.1. ANTECEDENTES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA**

La modelación hidráulica para los sistemas de abastecimiento, principalmente las redes hidráulicas, han ido evolucionando en la complejidad y la incertidumbre propias; volviendo un reto constante. Si bien la introducción de modelos matemáticos junto con el advenimiento de las computadoras en la década de 1960 allanó el camino para una precisión mucho mayor y permitió que se tuvieran en cuenta más factores. Lo que resultó en más precisión y análisis, tanto para los tomadores de decisiones como para los expertos en hidráulica. En la actualidad se siguen creando nuevos modelos para proporcionar mejores decisiones y respaldar el desarrollo sostenible a largo plazo.

Antes de exponer algunos conceptos específicos relacionados con la creación de modelos hidrodinámicos resulta oportuno registrar en este apartado algunos antecedentes investigativos que permiten establecer los avances que este tema ha logrado a nivel internacional.

Así, Tidwell et al (2013) publicó un trabajo cuyo propósito consistió en explorar los sitios en donde la disponibilidad de agua podría ser un factor limitante en la ubicación de nueva generación de energía eléctrica. Para respaldar este análisis, se mapeó la disponibilidad de agua a nivel de 3109 condados para los Estados Unidos. Se consideraron individualmente cinco fuentes de agua, que incluyen agua superficial no apropiada, agua subterránea no apropiada, agua apropiada (solo en el oeste de Estados Unidos), aguas residuales municipales y aguas subterráneas salobres. También se mapeó el crecimiento proyectado en la demanda de agua de consumo no termoeléctrico hasta 2035. Finalmente, las métricas de disponibilidad

de agua estuvieron acompañados de costos estimados asociados con la utilización de ese suministro de agua en particular. En última instancia, estos conjuntos de datos se desarrollan para su uso en el modelo del Sistema de Despliegue de Energía Regional (Reeds) de los Laboratorios Nacionales de Energía Renovable, diseñado para investigar el posible despliegue de nuevas instalaciones de energía en los EE. UU., sujeto a una serie de limitaciones, particularmente de agua.

Para el desarrollo de ese trabajo se plantearon modelos matemáticos para cada una de los diferentes usos del agua; el diseño de cada modelo se basó en aspectos técnicos y legislativos que fueron reflejados por medio de fórmulas que permitieron la proyección de las cifras en el período de tiempo objeto de la investigación. Dada la gran extensión geográfica del territorio de Estados Unidos, las fórmulas empleadas se definieron por regiones del país, para tener en cuenta los efectos tanto climáticos como legislativos que inciden en la disponibilidad de cada una de las fuentes de agua. Al final de ese trabajo se plantea que el modelo Reeds utiliza los datos de disponibilidad y costo del agua en forma de una curva de suministro de agua, en la que se traza la cantidad de agua disponible a un precio dado, o por debajo de él. El ejercicio permitió identificar regiones con relativamente poca disponibilidad de agua, especialmente debido a que se trata de agua no potable y costosa, especialmente en los estados de Texas y Montana. Así mismo se identificaron otras regiones que se caracterizan por tener agua no apropiada mucho más abundante, característica de sus ubicaciones en el este de Estados Unidos (Tidwell, et al., 2013).

Por su parte, Bingner y Theurer (2014) propusieron una ecuación revisada universal para la pérdida de suelo (en inglés, RUSLE) como la base dentro del modelo anualizado de

contaminación de cuencas hidrográficas por fuentes puntuales no agrícolas (en inglés, AnnAGNPS), el cual se utiliza para estimar la erosión de capas y riachuelos (arcilla, limo, arena, agregados pequeños y grandes) del paisaje de una cuenca. Esta erosión laminar y de riachuelos se utiliza para predecir el rendimiento de sedimentos (arcilla, limo y arena) del paisaje de la cuenca por AnnAGNPS, que es un modelo de cuenca hidrográfica de carga contaminante de fuente no puntual, de simulación continua, relacionado con la agricultura. El rendimiento de sedimentos finos (arcilla y limo) de la erosión por capas y riachuelos de las tierras agrícolas es una preocupación importante para las cargas contaminantes en los cuerpos de agua, como arroyos y canales. Mientras que AnnAGNPS también predice otras fuentes de sedimentos (barrancos, lechos y erosión de riberas), RUSLE se usa solo para estimar la erosión laminar y los arroyos.

La aplicación de RUSLE se utiliza para determinar dónde y cuándo puede ocurrir la erosión de la lámina y de los surcos. Los resultados de ese trabajo mostraron que la mayoría de los sedimentos gruesos (partículas del tamaño de la arena) se depositan en los campos, mientras que la mayoría de los sedimentos finos (arcilla erosionada y partículas del tamaño del limo que se arrastran en la escorrentía) se convierten en cargas de lavado y entran en los arroyos y canales.

Por su parte, Nazemi y Wheeler (2015) plantean que el uso humano de agua ha aumentado significativamente durante el pasado reciente y las extracciones de agua de las fuentes superficiales y subterráneas han alterado la descarga y el almacenamiento terrestres, con una gran variabilidad en el tiempo y el espacio. Estas extracciones son impulsadas por las demandas sectoriales de agua, y por lo general están sujetas a limitaciones de suministro,

que determinan la asignación de agua. El suministro y la asignación de agua, por lo tanto, deben considerarse junto con la demanda de agua e incluirse adecuadamente en los modelos del sistema terrestre para abordar varios efectos a gran escala con o sin considerar las posibles interacciones climáticas. En su trabajo revisaron los algoritmos desarrollados para representar los elementos de suministro y asignación de agua en la superficie terrestre y modelos hidrológicos globales.

Nazemi y Wheeler (2015) observaron que algunas implicaciones en línea potencialmente importantes, como los efectos de los grandes embalses en las retroalimentaciones de la tierra y la atmósfera, aún no se han investigado completamente. En cuanto a las implicaciones *offline*, encontraron que existen elementos importantes, como la disponibilidad y extracción de agua subterránea, y la representación de grandes embalses, que deben mejorarse. Identificaron las principales fuentes de incertidumbre en las simulaciones actuales debido a las limitaciones en el soporte de datos, los algoritmos de asignación de agua, los modelos alojados a gran escala y la propagación de varios sesgos en el sistema de modelado integrado.

Teniendo en cuenta estos hallazgos, observaron que los avances en las técnicas de cálculo y acoplamiento, así como las mejoras en la representación y parametrización de procesos naturales y antropogénicos en modelos anfitriones a gran escala, junto con la percepción remota y la asimilación de datos pueden facilitar la inclusión de la gestión de los recursos hídricos a mayor escala. No obstante, se deben considerar, diagnosticar y comparar cuidadosamente varias opciones de modelado. Nazemi y Wheeler (2015) propusieron un marco modular para desarrollar modelos integrados basados en múltiples hipótesis para el

soporte de datos, algoritmos de gestión de recursos hídricos y modelos anfitriones en un marco de evaluación de incertidumbre unificado. Una clave de este desarrollo es la disponibilidad de datos a escala regional para el desarrollo, diagnóstico y validación de modelos.

Finalmente, Liu et al (2018) tomaron el departamento de jardines verdes urbanos y sus alrededores en el distrito de Jinniu, ciudad de Chengdu en China, como su área de estudio, en donde utilizaron el Modelo de Manejo de Agua de Tormenta (en inglés Storm Water Management Model- SWMM) para simular las hidrógrafas de descarga en las salidas del sistema de drenaje cuando el área de estudio encontró tormenta de diseño con diferentes períodos de retorno bajo la situación actual y la situación aplicada (en inglés Low Impact Development-LID). Posteriormente, se analizaron los resultados de medidas LID en las inundaciones por tormentas urbanas para estimar la reducción de efectos en la ciudad. Los resultados muestran que las medidas LID pueden reducir efectivamente las inundaciones por tormentas urbanas, y los efectos de reducción son más obvios cuando el período de retorno de la tormenta de diseño es más pequeño, lo que proporcionará una referencia para la aplicación de medidas LID en el control de inundaciones por tormentas urbanas.

Un sistema de control y comunicación (Supervisory Control and Data Acquisition) SCADA es una red de área amplia de unidades terminales remotas que se comunican mediante ráfagas cortas en el rango de radiofrecuencia de 900 MHz. Las unidades terminales remotas son, por ejemplo, estaciones de control de energía utilizadas por una empresa de servicios públicos para controlar la distribución de energía en un área específica. Un sistema SCADA típico incluye un controlador maestro acoplado a una unidad de radio maestra a

través del módem y el enlace de microondas. Los mensajes del controlador maestro se envían a la radio maestra para su transmisión a múltiples unidades terminales remotas. Incluyendo solo una radio maestra; sin embargo, las distancias de comunicación de la red son limitadas, especialmente en terrenos accidentados. Además, utilizando módems de tipo telefónico, los tiempos de adquisición son relativamente lentos. Por consiguiente, existe la necesidad de sistemas que tengan un alcance y rendimiento mejorados (Gaushell & Darlington, 2007).

La calidad y confiabilidad del agua son preocupaciones importantes en el diseño y operación de una red de distribución de agua potable. La evaluación de la confiabilidad de las redes de distribución requiere una predicción del rendimiento de la red no solo en el funcionamiento normal sino también en condiciones excepcionales o fallas parciales, por ejemplo; requisitos de flujo de agua para flujo de fuego, roturas de tuberías, roturas de válvulas, fallas de bombas, cargas de alta demanda, etc. (Cristancho, 2018).

Así mismo, el modelado hidráulico de las redes de distribución de agua potable es una forma eficaz de analizar y diagnosticar las condiciones de funcionamiento de la red. Sin embargo, la mayoría de los modelos hidráulicos existentes son modelos de estado estacionario, que se utilizan principalmente con fines de planificación y calidad del agua. La naturaleza de estado estable de tal modelo limita la confiabilidad y la eficiencia de una red de agua, especialmente en condiciones parcialmente fallidas porque no permite el ajuste automático de parámetros (por ejemplo, curvas de bomba, válvulas de reducción de presión y válvulas de flujo) que mejorarían el rendimiento de la red de distribución.

Algunos modelos de redes de distribución consideran aplicaciones en tiempo real a fin de garantizar que la implementación de tecnologías de medición y registro se utiliza para proporcionar una mayor credibilidad y simplificar el proceso de modelado.

El control tradicional de la calidad del agua se realiza después del tratamiento del agua. Pero las fuentes de agua actuales son principalmente aguas subterráneas y superficiales. Son significativamente propensos a la contaminación química y microbiana. El control de calidad posterior al tratamiento del agua aparentemente retrasa la detección de riesgos y reduce el tiempo de respuesta para tomar medidas preventivas.

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas como indicadores. Entre los indicadores de calidad del agua, los indicadores biológicos tienen un impacto más directo sobre la salud de las personas. La mayoría de los estándares nacionales se elaboran sobre niveles de indicadores biológicos. Se realizan acciones de tratamiento adicionales de acuerdo con los resultados de la prueba, las pruebas de indicadores biológicos se basan principalmente en el cultivo de bacterias en el laboratorio. Este proceso puede tardar entre 24 y 48 horas.

El control tradicional de la calidad del agua se realiza después de su tratamiento. Las fuentes de agua actuales en algunos países son principalmente aguas subterráneas y superficiales, que son significativamente propensos a la contaminación química y microbiana. El control de calidad posterior al tratamiento del agua aparentemente retrasa la detección de riesgos y reduce el tiempo de respuesta para tomar medidas preventivas.

## 2.2. TÉCNICAS PARA LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

Existen diferentes procedimientos y técnicas para la modelación hidráulica, y a continuación se presentan algunas de las investigaciones que permiten crear una visión de los avances alcanzados en esta área del conocimiento, así como los diferentes usos que tienen esos desarrollos. En la práctica, la operación del embalse se suele realizar mediante el uso de curvas de regla, que sirven de guía a los operadores al estipular las acciones que deben tomarse condicionadas al estado actual del sistema. Las curvas de reglas se construyen normalmente a partir de modelos de simulación, pero también se pueden desarrollar mediante estrategias de optimización. La optimización estocástica implícita, también conocida como optimización de Monte Carlo, proporciona una forma de derivar curvas de reglas incorporando las incertidumbres de los flujos de entrada del yacimiento. ISO utiliza un modelo de optimización determinista para encontrar liberaciones óptimas de reservorios en varios escenarios de entrada diferentes. Para cada realización de entrada, se encuentra una política operativa diferente. Luego, se examina el conjunto de todas las políticas operativas con el fin de construir reglas de liberación de reservorios. Clásicamente, el análisis de regresión múltiple se aplica a los resultados de la optimización con el fin de desarrollar reglas de operación condicionadas a la información observable como los niveles de almacenamiento actuales, el período anterior y / o las entradas previstas. (Celeste, et al., 2009)

Con fines de control, los usuarios se han interesado más en la simulación de la evolución temporal de los flujos y presiones en las redes de distribución de agua; por lo tanto, se han introducido capacidades de simulación de período extendido (EPS); estos permiten la simulación de la variación lenta en las condiciones de flujo con el tiempo, como los debidos a los cambios diurnos de la demanda, alternando en el tiempo una sucesión de análisis de

estado estacionario en momentos fijos con una sucesión de cálculos de balance de masa en cada uno de los almacenamientos de agua de altura variable (generalmente denominados tanques) (Todini, 2011)

La programación dinámica (en inglés DP), es un procedimiento para optimizar un proceso de decisión de múltiples etapas. DP se utiliza ampliamente en la optimización del funcionamiento de los sistemas de recursos hídricos. La popularidad y el éxito de este método se pueden atribuir al hecho de que el comportamiento de toma de decisiones en varias etapas, junto con las características no lineales que caracterizan a un gran número de sistemas de recursos hídricos, pueden traducirse en un enfoque de programación dinámica.

El enfoque de modelado estructural interpretativo (ISM) ofrece un procedimiento gráfico único para construir la estructura jerárquica y el comportamiento dinámico de un problema complejo. El método de evolución compleja barajada SCE fue desarrollado en la Universidad de Arizona y es una alternativa robusta que permite la calibración de modelos de lluvia escurrentía (Wuni & Shen, 2019). El método se basa en cuatro conceptos básicos: la combinación de aproximaciones determinísticas y probabilísticas, la evolución sistemática de un sistema complejo de puntos extendidos espacialmente con los parámetros orientados, y la evolución competitiva mediante el barajado e los “complejos. Este método se usa con éxito para calibrar lluvias en países como Estados Unidos y Alemania (Vélez, 2003).

A su vez, SFLA es un algoritmo que se basa en una población de ranas que saltan buscando comida, de tal forma que las que se encuentran en una posición menos favorable intentarán emular a las que están en una posición ventajosa; al hacerlo, saltan en la misma dirección que estas últimas. El grupo total de ranas se organiza en subgrupos de manera que

evolucionan independientemente, y luego se barajan, e intercambian información sobre los beneficios de ubicarse en determinadas posiciones (Li, et al., 2018).

Entre tanto, los algoritmos genéticos (GA) fueron ideados en los 70's y es similar al algoritmo de estrategias evolutivas llamado  $(\mu, \lambda)$ . Su principal diferencia es la selección y reproducción, dado que los GA seleccionan progresivamente algunos padres y generan unos cuantos hijos hasta que se hayan creado en una cantidad suficiente. Los algoritmos genéticos se inspiran en el principio darwiniano de la evolución de las especies y en la genética. Son algoritmos probabilísticos que proporcionan un motor de búsqueda paralelo y adaptativo basado en el principio de supervivencia del más apto y reproducción (de Macêdo, 2017). En cambio, los algoritmos metaheurísticos se utilizan en las fases de calibración, diseño y operación de redes de agua; su ventaja consiste en que permiten la consideración de la no linealidad del problema como sucede en las redes hidráulicas y lograr explorar múltiples soluciones, ya sea al minimizar o al maximizar la función objetivo; los algoritmos metaheurísticos amplían el campo de búsqueda, con lo cual se logra identificar múltiples soluciones, además de que son versátiles y pueden emplearse con información limitada del problema a resolver (Mora, et al., 2017).

Dentro de los modelos que conforman la evolución computacional, están El Sistema de Modelación Hidráulica (en inglés Water Modeling System WMS), que contiene el modelo hidrodinámico 2-D RMA2, muestra buenos resultados de calibración y verificación, por lo que se puede utilizar en el análisis hidrodinámico de lagos para diferentes escenarios. Las técnicas de análisis numérico y modelado se consideran herramientas útiles para simular y pronosticar el transporte y las deposiciones de sedimentos en la entrada de lagos.

El modelado hidrodinámico se considera el núcleo de cualquier investigación de transporte y deposición de sedimentos; el modelado del proceso de sedimentación en la entrada del lago requiere la simulación de los campos de flujo en el área problemática y el uso de los datos de levantamiento batimétrico disponibles para los lechos del reservorio en el área. (El-Sammany & El-Moustafa, 2011)

Entre tanto, el sistema de modelado multidimensional de agua superficial del Servicio Geológico de Estados Unidos, conocido por su sigla USGS, es una interfaz gráfica de usuario (IGU) genérica para modelos computacionales de flujo y transporte en canales. El sistema de modelado está destinado a proporcionar al programa de operaciones del USGS las herramientas necesarias para estudiar y evaluar los problemas del agua superficial, que incluyen: total máximo de carga diaria, derechos de agua, restauración de canales y evaluación del hábitat. La IGU es una interfaz de modelado gráfico estándar que proporciona al usuario herramientas gráficas interactivas para la generación de cuadrículas, la gestión de atributos y condiciones de contorno específicos del modelo y la visualización de los resultados del modelado. Esta interfaz es genérica en el sentido de que prescribe una estructura de datos de entrada y salida fija que es lo suficientemente general para ser utilizada por cualquier modelo de flujo o transporte de unidimensional a multidimensional. La estructura de datos genérica permite la fácil incorporación de varios modelos en el marco. (McDonald, et al., 2018)

El interés en el modelado hidráulico se explica porque el uso humano de agua ha aumentado significativamente durante el pasado reciente. Las extracciones de agua de las fuentes de agua superficiales y subterráneas han alterado la descarga y el almacenamiento

terrestres, con una gran variabilidad en el tiempo y el espacio. Estas extracciones son impulsadas por las demandas sectoriales de agua, pero por lo general están sujetas a limitaciones de suministro, que determinan la asignación de agua. Por lo tanto, el suministro y la asignación de agua deben considerarse junto con la demanda de agua e incluirse adecuadamente en los modelos del sistema terrestre para abordar varios efectos a gran escala con o sin considerar las posibles interacciones climáticas. Se presentan algunas implicaciones potencialmente importantes, como los efectos de los grandes embalses en las retroalimentaciones de la tierra y la atmósfera, aún no se han investigado completamente; otras variables a considerar son la disponibilidad y extracción de agua subterránea, y la representación de grandes embalses. Existen fuentes de incertidumbre en las simulaciones debido a las limitaciones en el soporte de datos, los algoritmos de asignación de agua, los modelos alojados a gran escala y la propagación de varios sesgos en el sistema de modelado integrado (Nazemi & Wheeler, 2015).

El agua es un recurso natural escaso y vital para todos los fenómenos biológicos y actividades humanas que continuamente se necesita conocer en cualquier momento y lugar. Teniendo en cuenta el creciente crecimiento de la población y, en consecuencia, el aumento de las necesidades humanas, la limitación de los recursos hídricos es un desafío considerable para los humanos. Además, la distribución asimétrica del tiempo de lluvia y la ubicación en la mayoría de los países ha hecho que se considere la gestión y programación de los recursos hídricos. Para resolver este problema, los investigadores están tratando de utilizar algunas técnicas relacionadas con la programación y la gestión durante mucho tiempo. La mayoría de los problemas prácticos y aplicados pueden modelarse como un problema de programación lineal con respecto a todas las complejidades intrínsecas.

El motivo mencionado y también la presencia de diferentes softwares de resolución de problemas de programación lineal han provocado que la programación lineal se utilice como uno de los métodos más prácticos en el campo de la operación de presas durante años. En esta investigación, presentamos problemas de funcionamiento óptimo de los yacimientos mediante el uso de técnicas de programación lineal y discutimos sobre ellos. Además, se introdujeron modelos objetivos y multi-objetivos mediante el uso de algunas preguntas. Finalmente, se introducen algunos métodos populares en el campo del modelado de tales problemas.

El mapeo del uso del suelo y la cobertura del suelo a partir de imágenes de teledetección tomadas en varias ventanas temporales para la misma región con la debida estandarización, forma una base sólida para el monitoreo, la modelación e incluso la predicción de diversos factores socio-económicos, hidrogeológicos y regímenes climáticos de un área. Se han realizado varios trabajos utilizando el modelo de elevación digital (en inglés Digital Elevation Model - DEM) en regiones similares en el sur de la India para diversos fines. Recientemente desarrolló una red de drenaje basada en cuadrículas en DEM que aborda la necesidad de considerar la irregularidad del terreno para evitar el flujo en líneas paralelas a lo largo de direcciones preferidas y el efecto inducido por la presencia de pozos artificiales. Estudios posteriores sobre la evolución morfométrica de las cuencas hidrográficas, basada en las interacciones entre los flujos de materia y energía y la resistencia de la superficie topográfica, implica el uso de información de mapas, fotografías aéreas y / o imágenes satelitales y levantamientos de campo y estimación de áreas, los perímetros, longitudes, pendientes, densidad de drenaje y cobertura del suelo pueden calcularse directamente o mediante la aplicación de fórmulas e índices (R., et al., 2019).

En el caso de aguas poco profundas se utilizan ecuaciones para modelar los flujos de fluidos que se desarrollan predominantemente a lo largo de la dirección horizontal, en sentido longitudinal y lateral. De hecho, la hipótesis de las aguas poco profundas asume componentes de velocidad vertical insignificantes. La aplicación de esas ecuaciones abarca desde modelos a gran escala en meteorología, oceanografía o modelos de tsunamis, así como también modelos a menor escala de morfología de ríos, avalanchas, flujos de escombros y deslizamientos de tierra y, a escalas aún menores, la teoría de la lubricación. La mayoría de estas aplicaciones deben considerar una topografía de fondo general, comandada por ejemplo por los paisajes de montaña, en los que se introducen dificultades matemáticas que aún no tienen una solución integral. (Bachini, et al., 2019).

Se han mapeado depósitos superficiales del terciario superior al cuaternario a escala 1:250,000 como parte de un mapa geológico regional y una base de datos digital que proporcionan la base para un marco hidrogeológico detallado para el modelo correspondiente al sistema de flujo regional de aguas subterráneas del Valle de la Muerte. Este modelo está siendo desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos, en colaboración con el Departamento de Energía. La identificación de la unidad en los mapas de imágenes está respaldada por la interpretación fotográfica estereográfica de fotografías aéreas en blanco y negro a gran altitud, la calibración de los datos de campo, recopilados en más de diversas estaciones ubicadas por GPS dentro del área del modelo que se están compilando en bases de datos relacionales, y variaciones en las características geomórficas que pueden derivarse del modelo de elevación digital de 30 m. El mapeo superficial se clasifica en unidades hidrológicamente significativas que contienen tanto subdivisiones aluviales cronoestratigráficas generalizadas que reflejan el desarrollo del pavimento y el suelo,

endurecimiento y disección interna, como unidades adicionales de importancia hidrológica. (Menges, et al., 2011)

Para ese propósito, el software COMSOL es un paquete de análisis y resolución de elementos finitos para diversas aplicaciones de física e ingeniería, especialmente fenómenos que involucran simultáneamente múltiples variables. El software incluye un entorno completo para modelar cualquier fenómeno físico y se ha convertido en el estándar de la industria para el modelado, la investigación y el diseño. El paquete de software es compatible con casi todas las plataformas como Windows, Mac, Linux y Unix). COMSOL versión 3.5 incluye 12 módulos organizados en un entorno unificador de simulación y ofrece una interfaz para MathWorks (Li, et al., 2016).

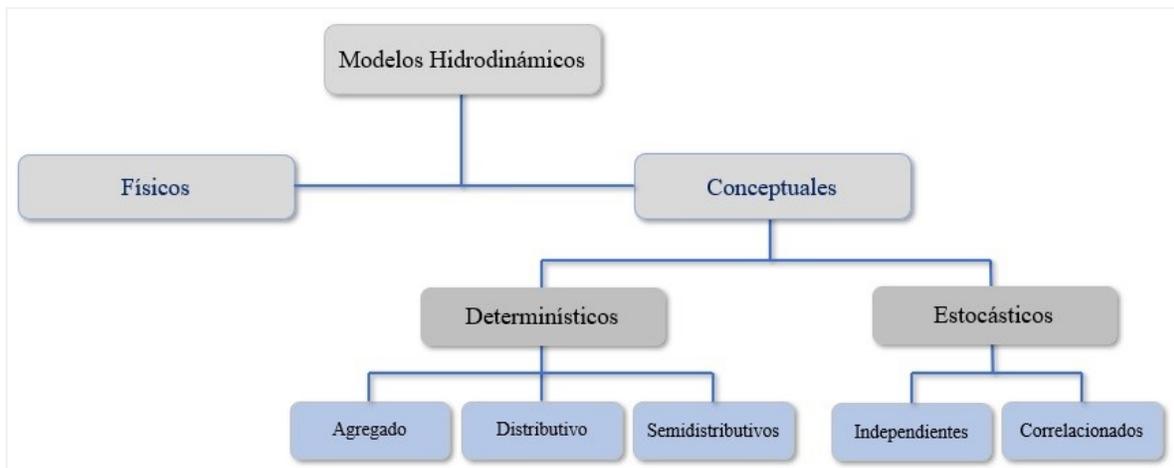
La naturaleza de estado estable de todos los modelos hidráulicos fuera de línea limita la confiabilidad y eficiencia de las redes de agua. Estos modelos se aproximan a miles de parámetros desconocidos utilizando una muestra a corto plazo de un subconjunto de datos hidráulicos. Por lo tanto, no se espera que los resultados de la calibración representen con precisión las condiciones del sistema para la gama completa de condiciones operativas que pueden ocurrir. Un modelo hidráulico dinámico en tiempo real que considera continuamente las mediciones hidráulicas en línea proporciona predicciones más realistas (Abu, et al., 2016).

A su vez, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) están emergiendo como importantes herramientas de manejo de datos espaciales para el inventario y la gestión de recursos naturales. En el caso de aplicaciones de modelos de simulación para problemas relacionados con aguas superficiales, un SIG puede servir como una plataforma de datos y un entorno de usuario orientado a gráficos. Sin embargo, antes de utilizar los datos y modelos

disponibles, es necesario analizar los requisitos de información del problema, el contenido de la base de datos y las condiciones de contorno dadas para configurar los modelos y los datos de la manera más efectiva y económica. El diagnóstico de problemas y los pasos de pre-procesamiento, como la discretización de dominios, la selección de parámetros del modelo y la calibración, requieren experiencia en problemas, métodos y herramientas específicas. (Arnold, et al., 2009)

Los modelos hidrodinámicos se construyen para administrar variables de entrada y salida como son las precipitaciones, las infiltraciones, las escorrentías y las abstracciones hidrológicas; esas variables se gestionan por medio de ecuaciones matemáticas interrelacionadas y pueden ser de diferentes tipos, como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1. Clasificación de los modelos hidrodinámicos**



Fuente: Arteaga (2017)

A su vez, cada uno de esos tipos de modelos es descrito en la Tabla 1.

**Tabla 1. Tipos de modelos hidrodinámicos**

Tipo de modelo	Características
Modelos físicos	Representan la realidad mediante un modelo a escala
Conceptuales o numéricos	Se basan en una representación matemática del sistema hidrológico por medio de ecuaciones y producen proyecciones cuantitativas del comportamiento de las cuencas hidrográficas
Modelos determinísticos	Se caracterizan por generar una sola salida independientemente de la entrada, por lo que no permiten simulaciones aleatorias
Modelos estocásticos	Toleran aleatoriedad en los datos de salida en función de la incertidumbre de las variables de entrada
Modelos agregados	En éstos se considera que la precipitación es uniforme a lo largo de la cuenca
Modelos distributivos	Admiten la variación de los parámetros de entrada a lo largo de la cuenca
Modelos semi-distributivos	Utilizan datos discretos para la representación del flujo a lo largo de diferentes tramos de la cuenca y tienen en cuenta el intercambio entre puntos adyacentes
Modelos independientes	Permiten la representación como una secuencia de eventos que no se correlacionan
Modelos correlacionales	Consideran que los eventos adyacentes se interrelacionan de forma parcial
Modelos eventuales	Asumen que la cuenca se comporta de acuerdo con eventos individuales de lluvia generando efectos en la escorrentía superficial, el caudal y el tiempo de máximo nivel
Modelos continuos	Consideran períodos más largos de tiempo que incluyen condiciones secas alternadas con condiciones húmedas

Fuente: elaboración propia con base en Arteaga (2017)

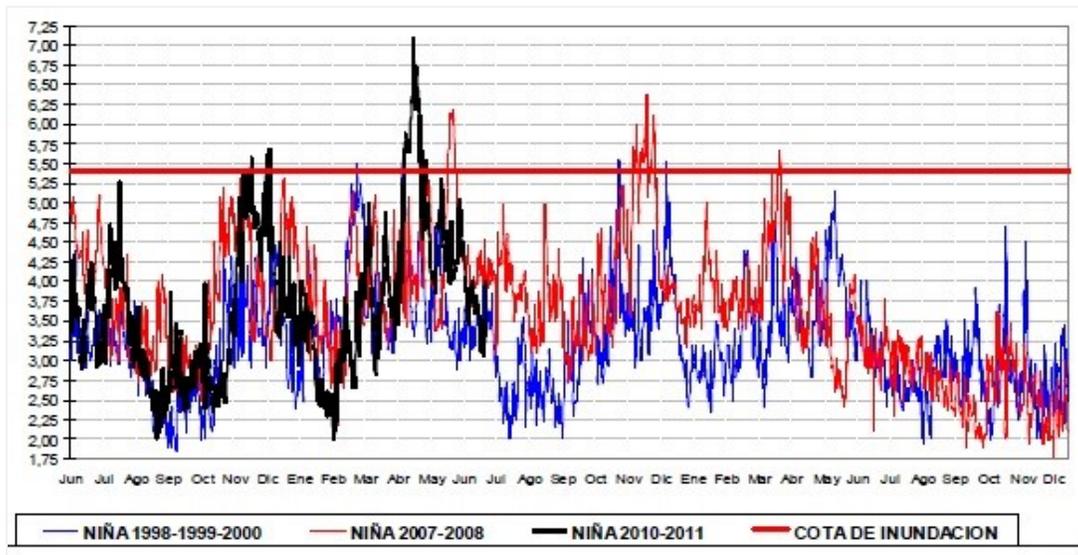
El monitoreo de sistemas hídricos como ríos, sistemas de alcantarillado, embalses, sistemas de acueductos, canales de drenaje, entre otros, consiste principalmente en capturar y analizar información de nivel de lámina de agua, velocidad de flujo y caudal que fluye en

cada uno de los cuerpos de agua, todo esto de manera continua para el registro de información minuto a minuto, durante 24 horas del día, 7 días de la semana.

La demanda de este tipo de servicios se ha visto acelerada por los inevitables efectos naturales ocasionados por el cambio climático y el aumento de los registros de eventos por desastres, que llegó a ocasionar 3.181 muertos y 12,3 millones de afectados entre 2006 y 2014 (DNP, 2018). A nivel mundial, durante los últimos 40 años los desastres naturales han ocasionado pérdidas que alcanzan aproximadamente US\$ 7.100 millones, con un promedio de pérdidas anuales de US\$ 177 millones. En el periodo entre 1970 y el 2011 se han registrado más de 28.000 eventos de riesgo, de los cuales cerca del 60% se reportan a partir de la década de 1990. Además, durante el 2010 y el 2011, se alcanzó una cantidad cercana a la cuarta parte de los registros y muertes de la década anterior, gracias al fenómeno de la niña que afectó de manera notoria al país en dicha época (Banco Mundial, 2012).

Esas cifras hacen cada vez más necesario el monitoreo de información, que permite tener conocimiento del comportamiento y la identificación de patrones de los sistemas hídricos de tal manera que se puedan recopilar y procesar información constantemente, patrones que alimentan modelos matemáticos, los cuales permiten generar pronósticos de amenaza o vulnerabilidad ante fenómenos extremos.

Los patrones para copilar y procesar sistemas hídricos y sistemas de alcantarillado permiten evaluar características hidráulicas como velocidad, capacidad de llenado, altura de la lámina de agua y caudal, que permiten descifrar concretamente la operación del flujo a través del tiempo. A manera de ejemplo, En la Figura 2 se presentan los niveles del Río Magdalena en la estación de Puerto Salgar, de acuerdo con el IDEAM (2011)



Fuente: IDEAM (2011)

**Figura 2. Niveles del Río Magdalena en Puerto Salgar (Cundinamarca)**

Con base en información como la que se muestra en la Figura 2 es posible definir el comportamiento del caudal y el nivel de manera continua en una zona del país o en una tubería de alcantarillado específica, con lo que se genera la información base para análisis de escenarios como inundaciones o calibrar modelos matemáticos que permita validar la confiabilidad de los resultados del modelo. Los sistemas hidráulicos son diseñados y estudiados a través de modelos matemáticos, los cuales han alcanzado aceptación como herramientas indispensables para el diseño, gestión y explotación de estos sistemas. Este logro ha sido posible fundamentalmente por la capacidad de los modelos matemáticos de reproducir con adecuada precisión la dinámica de los sistemas hidráulicos (Bosch & Recio, 2014).

La calibración de los modelos hidráulicos ya es una actividad reglamentada y exigida por las principales normas de diseño como el Reglamento Técnico del Sector de Agua

Potable y Saneamiento Básico (RAS - 2014), Norma de diseño de Acueducto y Alcantarillado NS - 85 de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), y Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto y Alcantarillado de EPM, entre otras.

El cambio climático es un fenómeno que está afectando a todos los seres vivos, sometiéndonos a condiciones extremas como por ejemplo sequías, precipitaciones extremas, y cambios drásticos de temperatura, que generan eventos extremos como inundaciones y/o movimientos de masas agresivos; esos fenómenos generan efectos como pérdida de vidas humanas y de animales, daños de infraestructura y por consiguiente pérdidas económicas que amenazan el desarrollo del país (Banco Mundial, 2012)

Una de estas amenazas con mayor impacto son las inundaciones repentinas, fenómenos hidrológicos que se forman muy rápidamente y son difíciles de predecir, como las que recientemente se han presentado en ciudades como Barranquilla y Mocoa, que han sido mortales y causan daños a la propiedad pública y privada (Cama, et al., 2016).

Estas inundaciones son productos de la combinación de la intensidad y duración de la precipitación y el proceso de producción de escorrentía rápida, además de factores hidrológicos, como las características del suelo y las cuencas hidrográficas donde los flujos de escorrentía definen su nivel de riesgo.

Con el fin de reducir los efectos causados por las inundaciones aparecen los Sistemas de Alertas Tempranas (SAT) o Early Warning Systems (EWS), los cuales han sido conformados por dispositivos de monitoreo, cuya función principal es reducir al mínimo, para evitar los daños producidos por amenazas de distintos tipos en la propiedad pública o privada, al medio ambiente, a los medios de subsistencia y a la humanidad en general.

Debe resaltarse en este punto que los desastres afectan de manera desproporcionada a las personas con el nivel socioeconómico más bajo, incluidos los que sufren de pobreza, así como las minorías y los grupos discriminados. En muchos países en desarrollo, el nivel socioeconómico más bajo de la mujer, que implica un acceso desigual a la información, la salud y los activos, contribuye a una menor capacidad de la mujer para hacer frente a los desastres (UNDP, 2019).

Los Sistemas de Alertas Tempranas (SAT) corresponde a componentes, dispositivos o equipos que están asociados a recopilación de datos, control, detección y reacción ante riesgos directos y riesgos asociados, mediante tecnologías que permiten monitorear de manera continua el comportamiento del flujo en los cauces, velocidad, intensidad de la precipitación y altura de la lámina de agua.

### **2.3. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS**

Ciertas aplicaciones de la ingeniería hidrológica e hidráulica requieren análisis complejos que involucran variaciones temporales y espaciales de precipitación, abstracciones hidrológicas y escurrimiento. Estos análisis encierran un gran número de cálculos complejos e iteraciones que hacen necesaria la implementación y uso de modelos matemáticos: los cuales son ejecutados con la ayuda de computadores (Bosch Fuentes & Recio Villa, 2014).

Un modelo matemático corresponde a una abstracción matemática a través de la idealización que preserva las propiedades estructurales de las condiciones reales. Los modelos matemáticos que se usan, consisten en la integración de procesos hidrológicos, climatológicos, y sistemas de drenaje o flujo, con propósitos de análisis, diseño, estimación

de caudal o escorrentía de largo plazo, predicción de volumen y predicción o pronóstico del flujo en tiempo real (Cárdenas & Alejandro, 2008).

Otro de los métodos de análisis de los sistemas hidráulicos, además de los modelos matemáticos es a través de la medición directa y continua de condiciones como la velocidad, el caudal, las propiedades químicas o la lámina de agua. Sin embargo, con dicho sistema de medición contrario al modelo matemático, no se tiene una simplificación o idealización de las condiciones del sistema, ya que se registra el comportamiento real del sistema en estudio, aunque no permite realizar proyecciones o estudiar condiciones futuras, lo que hace necesaria la utilización de los modelos matemáticos.

En consecuencia, el comportamiento hidráulico de un sistema, no puede ser descrito completamente por los modelos matemáticos o las mediciones (Cárdenas & Alejandro, 2008). Por ende, los buenos resultados de una simulación matemática se obtienen al combinar buenas y precisas mediciones con modelos matemáticos acertados.

La calibración de los modelos matemáticos consiste básicamente en el proceso por medio del cual se logra que el modelo reproduzca los datos medidos lo mejor posible. Una definición aproximada de calibración la describe un proceso en el que los parámetros de un modelo reproducen con gran exactitud, los datos medidos de una situación específica. (Bosch & Recio, 2014).

Existen numerosos paquetes de software que proporcionan análisis hidrológicos e hidráulicos rápidos y precisos enfocados en definir las propiedades de los sistemas hídricos como presión, caudal y velocidad de flujo, dependiendo de las condiciones de estudio de cada sistema (Burneo, et al., 2016).

Así mismo, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca recomienda que se realicen métodos hidrológicos e hidráulicos que permitan la delimitación de las zonas que presentan frecuentes riesgos de inundación, para diferenciarlas de aquellas en donde ese riesgo es ocasional o excepcional. El mismo tipo de análisis se deben adelantar en cuencas altas, quebradas y ríos tributarios, así como visitas de campo previas a la acometida de cualquier intervención de carácter preventivo o correctivo (CAR, 2015)

Es posible encontrar que sistemas que se conocen como estáticos. La salida de un sistema estático permanece constante si la entrada no cambia, o varía sólo cuando la entrada cambia. En un sistema dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no está en su estado de equilibrio.

De acuerdo con el sistema estudiado, cualquier tentativa de diseño de un sistema debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes de que el sistema pueda diseñarse en detalle o construirse físicamente; tal predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama modelo matemático. Para los sistemas físicos, la mayoría de los modelos matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales. Al aplicar las leyes físicas combinadas con las ecuaciones matemáticas a un sistema específico, se traduce en desarrollar un modelo matemático que describa el sistema. (Martin, 2010)

## **2.4. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS EN ABASTECIMIENTO DE AGUAS**

Dentro de los recursos iniciales que utilizó el ser humano para resolver el abastecimiento de agua, fueron los métodos de almacenamiento familiar, los cuales se conformaban por almacenamientos pequeños designados para aprovisionarse del agua que provenía de la lluvia. De allí, se pasó a los métodos que, fuera de guardar depósitos, efectuaban las labores de transporte de agua, sobre lo cual sobresalió el Imperio Romano. En esta etapa el avance y el perfeccionamiento en los métodos de abastecimiento no solamente eran a causa de un requerimiento, sino que surgían como una señal de poder y de desarrollo.

Los obstáculos técnicos que acarrea el conducir el agua a presión se hacían palpables, no solamente por los materiales con que contaban, sino las técnicas para la elaboración de tuberías y otros componentes que no posibilitaban el adecuado control y marcha de las redes; esto motivó que, en esta etapa, la ingeniería civil se direccionara a la construcción de obras a través de las cuales se condujera el líquido en lámina libre, como por ejemplo los acueductos y presas.

El direccionamiento en cuanto a la vigilancia de las aguas a través de lámina libre, fusionado con la demora en el avance referente a los saberes acerca de la hidráulica, retardó el progreso en los métodos de abastecimiento de agua a presión. De tal forma que, gracias a la difusión de la obra de Bernoulli en el año 1738 llamada *Hydrodynamics* se constituyó un avance esencial en la ciencia de la mecánica de fluidos; puesto que a través de ella surgió la explicación de la naturaleza de la presión dinámica, y se pudo conocer el rol que tenían las pérdidas de carga en el flujo, surgiendo de allí los fundamentos de lo que se denomina el principio de Bernoulli.

Gracias a estos progresos, se posibilitó en el año de 1754 la puesta en marcha del primer abastecimiento de agua a presión para las ciudades, y la primera donde se implementó este sistema, fue en la ciudad de Betlehem en el estado de Pennsylvania (Espín, 2014).

La labor realizada a causa de este bien tan fundamental, ha conformado un reto desde los inicios de los tiempos, desde que comenzaron los establecimientos iniciales de comunidades en la ciudad de Uruk, en Babilonia (hoy en día Irak) para el año 3500 a.C., donde buscaban proveer a sus ciudadanos de este bien. Es esencial destacar el manejo de este recurso dado por diferentes culturas, que son las que han otorgado su visión, tecnología y conocimientos para mejorar la vida de todos los ciudadanos y así mismo de toda la humanidad.

De esta forma, este recorrido inicia con Grecia, donde en épocas antiguas los ingenieros minoicos fueron avezados en cuanto a la coacción de las técnicas hidráulicas, y se sabe de explotaciones de recursos acuíferos como regadíos de las regiones de Cnosos y Zakro; con manantiales, acueductos, cisternas y pozos, a través de los cuales almacenaban el agua lluvia del palacio de Festos, y preservaban sus cisternas.

En Atenas la capital de Grecia, existía la dificultad de que contaba con un sistema variable de lluvias, por lo tanto, debieron crear un método para almacenar agua lluvia en grandes cantidades, y poder utilizarla cuando pasaban épocas de insuficiencia; de tal forma, que utilizaron diversas cisternas y depósitos como la Hybla, en Sicilia, que contaba con 1300m de perímetro y 9 m. de profundidad, por donde pasaban las agua lluvia hasta el mar. Este tipo de cisterna o pozo tenía tres utilidades: Como piscina, estanque de peces y depósito de agua para el riego. En cuanto al uso de estos recursos hídricos de esta época, fueron

reglamentados en Atenas inicialmente por Solón, quien fue escogido en el año 594 a. C, como una forma de magistrado que cumplía labores de gobierno, normas que fueron redactadas por Plutarco, y estaban enfocadas a la anti polución, con el fin de mantener las aguas públicas limpias.

Posteriormente vinieron los romanos, quienes se encargaron de refinar y corregir los sistemas de gestión y uso de las aguas; en efecto, fue la primera civilización que se interesó en prestar atención a la calidad de vida del ciudadano, puesto que el Estado destinaba recursos para otorgarle a la sociedad determinados beneficios que actualmente se consideran normales, como por ejemplo que, el agua llegaba en abundancia por los acueductos y por el almacenamiento en enormes cisternas; acueductos que fueron construidos por todo el imperio a través de la cimentación de albercas por todo su paso.

Este *aqueductus* (conducto de agua) conformaba una de las construcciones de mayor transcendencia para los grupos tanto urbanos como rurales. Los requerimientos iniciales a abastecer se conformaban por las termas y las fuentes, y posteriormente casas privadas que cancelaban para contar con el servicio de agua corriente, como, por ejemplo, en Pompeii y Cesárea, donde contaban con el abastecimiento de agua de forma constante; de igual manera, se cimentaron debajo de las casas cisternas públicas y privadas que se perforaban en las rocas.

El abastecimiento a los diversos puntos de la ciudad, donde se utilizaba el agua, era el propósito esencial cuando se construía esta red como Termas, ninfeas, fuentes, pozos y juegos de agua. Existieron diversos acueductos creados en esa época como los acueductos de Segovia, Mérida y Tarragona, que suministraban a esas ciudades a través de manantiales que estaban ubicados a más de 50 km. de distancia. En especial, el acueducto de los Milagros, en

Emérita Augusta (del siglo I d.C.), capital de Lusitania, la cual contaba con su “*caput aquae*” o captación de agua en el Embalse de Proserpina, que tenía una longitud de más de 15 km.

De igual forma, el emperador Claudio mandó construir el Aqua Claudia, que era el acueducto más grande de Roma, que fue edificado a mediados del siglo I d.C., y era el encargado de brindar agua a los 14 distritos de Roma, sin embargo, el más antiguo apunta al año 312 a.C. llamado *Aqua appia*, que lo mandó a construir el emperador Appio Claudio Cieco con una longitud de 1,6 km de distancia desde su punto de toma.

La iniciativa más concluyente la marcó el emperador Augusto y su yerno, Marco Agripa, quien construyó el *aqua virgo*, que, según una leyenda, que dice que una doncella le señaló donde se hallaba el agua más cristalina; de este acueducto tienen suministro actual algunas fuentes ornamentales en Roma, dentro de las cuales está la Fontana de Trevi. Para su construcción se utilizaron los recursos mineros propios que diligenciaba para ejecutar las tuberías de plomo. Desde el emperador Augusto, los propios emperadores donaban recursos para la subvención de infraestructuras hidráulicas y demás.

La cimentación de los acueductos, conformaba una labor bastante costosa, y además era un deber de las ciudades del imperio romano, y conjeturan la primera muestra de subvención de un recurso básico para la comunidad.

De igual forma, según (Argudo, 2019) cuando cae el imperio romano y llega la cultura árabe a la península ibérica, éstos deben crear y fundar nuevas ciudades a causa de los daños ocasionados en las estructuras de las ciudades romanas como por ejemplo: Córdoba, Sevilla, Mérida, Zaragoza, Toledo, etc., encontrando en ellas cultura romana, árabe, judía y cristiana

en una sana convivencia; ciudades que contaban con: Casas, palacios, fuentes públicas, *hammams* o baños, depósitos y canalizaciones urbanas.

Con relación al manejo y distribución del agua en la cultura islámica, estas poblaciones se sometían a las normas del islam a causa de conformar el conjunto de DAR al islam, por lo tanto, las normas eran transgresoras en cuanto a la manera de estructurar el uso del agua. Las normas que regían el mundo musulmán, señalaban que la propiedad y manejo del agua se fundamentaban en los principios islámicos, así como normas y costumbres locales. Los aspectos de mayor trascendencia era el caudal, y quién realizaba la labor de captación y/o direccionamiento del agua; de tal forma que, se fraccionaban los usos y usuarios con base en la clase de captación: i) Grandes ríos, para todos, ii) Ríos pequeños, existían limitaciones, iii) Ríos sin presa, tenían preferencia los ribereños y terceros, evitando causar daños, iv) Ríos con presa: Tenían derecho el asentamiento más antiguo, si son contemporáneos, riega inicialmente el que esté más cerca del nacimiento del río.

De otra parte, los primeros almacenamientos, que se presentaban en forma de depósitos de acopio de agua para cuando ésta fuese de necesidad, surgieron en la Edad Media; y este depósito de agua impidió la limpieza constante del sistema de alcantarillado, lo cual generó la primer gran epidemia de peste bubónica. Dentro de los ejemplos de cisternas de almacenamiento, está la que se encuentra en Constantinopla (Estambul hoy en día) con la cisterna Yerabatan cimentada con base en los escombros de los templos paganos, desaprobados y penalizados por el cristianismo; actualmente, se conoce como Basílica-Cisterna, Cisterna de la Mesua o Palacio Sumergido, la cual fue construida con un nivel

científico bastante disminuido. Esta epidemia se presentó a la par con la cimentación y uso de estos depósitos, generando el decaimiento de la ingeniería romana.

Con posterioridad, fue Italia quien le otorgó un nuevo resurgir al manejo y distribución del agua a través de innovación técnica, gracias al aporte de nuevas ideas de mentes y obras de arquitectura e ingeniería que posibilitaron el surgimiento de la época del Renacimiento. Al momento en que cae el imperio romano para el año 476 d.C. desaparece el dominio de los emperadores, y Europa empieza a ser regida por reyes alemanes del Sacro Imperio Romano Germánico. Es así como las repúblicas italianas buscan recobrar su posicionamiento por medio de la reactivación de Europa, y es allí donde se presenta la era de los arquitectos y constructores.

Durante los siglos XII al XVI emergen en las ciudades estado italianas dirigentes novedosos como los Mercaderes, conformados por nobles que no pertenecen a la aristocracia, aunque su dominio económico los implanta como seres necesarios para el renacimiento italiano. Durante estos siglos, la ciudad conforma el fundamento del renacimiento, dentro de ellas está la ciudad de Siena, donde se asentó bastante gente, al igual que sucedió en Roma, Pompeya y Cartago; para los persas y mayas, la base fundamental era el agua.

El suministro del agua para Siena, se efectuó a través de una red de acueductos que venían de fuera de la ciudad, llamados “*bottini*”, que contaban con pozos de registro para el mantenimiento, preservación y ventilación; e igualmente, para que entrara luz en su interior. Sin embargo, la ingeniería hidráulica no fue capaz de prever la catástrofe de la peste negra en 1347, en dicha circunstancia, Siena perdió alrededor del 60% de su población en corto

tiempo, y no podía restaurar el posicionamiento que tenía en la Italia moderna, a causa de lo cual surgió Florencia.

En el siglo XV de la Italia renacentista, inicia una nueva actitud de humanidad frente al conocimiento científico de los molinos y su desarrollo en cuanto al préstamo de servicio a la humanidad. Quienes conformaron los primeros ingenieros militares fueron Taccola, Francesco di Giorgio Martini, así como el mismo Leonardo Da Vinci, quienes se preocupan por los molinos, los dibujan, y efectúan cambios. Sin embargo, existe un conocimiento más austero de los molinos por el español Jerónimo Grava, ingeniero hidráulico que escribió el tratado “Declaración del uso y fábrica de instrumentos de agua, molinos y otras cosas”. También estuvo presente el ingeniero español Pedro Juan de Lastanosa, quien realizó estudios y diseñó artefactos hidráulicos, escribió la obra “veintiún libros de los ingenios y las máquinas” publicado en 1589. Personaje que además analizó la manera de solucionar el abastecimiento de aguas a la ciudad de Nápoles, memorias recopiladas en un documento llamado “Discurso de las aguas del Selino”; quien, además señaló que el agua conformaba uno de los cuatro componentes que Dios ha puesto en la naturaleza para provecho del ser humano, además de que recalca los beneficios energéticos del agua como “combustible”, así como mueve las industrias de harinas fundamentales para las comunidades (Argudo, 2019).

Posteriormente, surge la etapa de la revolución industrial que va desde el siglo XVII hasta la mitad del siglo XIX, fundamentalmente en la ciudad de Londres. Para el siglo XIX, Londres conforma la ciudad más grande, así mismo, capital del imperio británico. Para el año 1800 vivían allí cerca de un millón de personas, y para los años 1900, pasó a una cifra cercana a los 6,7 millones de personas. Así como se transformó en una ciudad de riqueza, a su vez,

también lo fue en una ciudad de pobreza, ya que miles de personas, se aglomeraban y se unían de manera nociva y perjudicial.

Para el año 1855 surge la Junta Metropolitana de Obras Públicas, que brinda una infraestructura apropiada para enfrentar el crecimiento de la ciudad, que tenía la labor esencial de enfrentar las dificultades de saneamiento. La Junta nombra como ingeniero principal a Joseph Bazalguette en 1856, y con él, el parlamento británico le concede la creación del monumental proyecto de renovación del sistema de alcantarillado en Londres, que consistía en construir 83 millas de alcantarillas principales subterráneas de ladrillo, con el fin de obstaculizar las salidas de aguas residuales, así como otras 1100 millas (1800 km) de alcantarillado de la calle principal, para obstaculizar las aguas residuales crudas que vertían de manera libre por las calles y carreteras de Londres; suceso que generó que las muertes se redujeran, así como la epidemia de cólera. Este sistema hubiese sido mejorado, si no hubiese colapsado en 1960, pero aún sigue vigente, 154 años después de que fue inaugurado.

En el tiempo actual, el saneamiento es considerado de preferencia. En la cumbre de las Naciones Unidas llevada a cabo en el año 2015 acerca del desarrollo sostenible, existieron respuestas esenciales como por ejemplo la Agenda de Desarrollo Sostenible, donde se aprobaron los 17 objetivos de desarrollo sostenible, argumento que fue reglamentado por 193 líderes del mundo, en donde instauraron tres objetivos determinados para el período 2015-2030 como son: Fin de la pobreza extrema, lucha por la desigualdad e injusticia, y luchar contra el cambio climático.

De esta forma, se debe analizar la preponderancia y la celeridad en realizar inversiones en infraestructuras hídricas para el desarrollo económico de los países que lo requieren, buscando la eficacia hídrica y sustentabilidad que respalde los beneficios del desarrollo económico y social. Con relación al abastecimiento de agua y el saneamiento e higiene, actualmente, existe una confluencia de dificultades, puesto que existen millones de personas en el mundo que no cuenta con una buena fuente de agua potable para su suministro, así como viven sin contar con instalaciones apropiadas de saneamiento (Argudo, 2019).

#### **2.4.1. Modelación dinámica de abastecimiento.**

La modelación dinámica es un método de modelado y simulación para la gestión industrial y la toma de decisiones, fue introducido como parte de la teoría del control de la retroalimentación (Lingling, et al., 2012) y los conceptos de pensamiento sistémico (Richmond, 2001), se utiliza como una herramienta para simular cuantitativamente, con cierto grado de precisión dentro de un sistema de recursos hídricos (por ejemplo, modelos de lluvia-escorrentía o calidad del agua, o más avanzados redes de abastecimiento). Estos modelos fueron, en general, los primeros intentos de adaptar los sistemas dinámicos a la modelización de los recursos hídricos. Esta clase de modelos se han aplicado a una variedad de problemas relacionados con el agua, incluido el modelado de la oferta y la demanda (Langsdale, et al., 2007), modelado de generación hidroeléctrica (Teegavarapu & Simonovic, 2014), entre otras.

La principal ventaja de este tipo de modelación es la capacidad de considerar bucles de retroalimentación ayuda a los modeladores a mejorar la precisión de sus predicciones sobre el comportamiento del sistema, especialmente cuando se trata de la toma de decisiones

a largo plazo. Esto ayuda a los modeladores a reducir el número de parámetros de entrada y a confiar en la dinámica interna del sistema.

#### **2.4.2. Sistemas de abastecimiento: desalinización.**

Las tecnologías de desalinización térmica ampliamente utilizadas incluyen: flash de múltiples etapas (multi-stage flash MSF) y compresión de vapor (VC).

Los procesos térmicos consumen mucha energía y son los más adecuados para zonas con bajos costes energéticos, como Oriente Medio. El intercambio iónico y la extracción con disolventes se encuentran entre los procesos de desalinización química que pueden utilizarse para la eliminación de iones de aguas salinas, pero su eficacia es suficientemente alta sólo a bajas concentraciones iónicas (García, 2017).

Las técnicas de membrana incluyen microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO). Estos son procesos impulsados por presión para eliminar partículas, bacterias y sales del agua mediante la exclusión de tamaño a través de membranas con diferentes tamaños de poro (Feria, et al., 2017). La RO es una técnica ampliamente utilizada debido a su consumo de energía relativamente bajo en comparación con los procesos térmicos.

La tecnología está madura y representa aproximadamente el 65% de la capacidad de desalación instalada en el mundo. Sin embargo, las operaciones de alta presión y la sensibilidad de las membranas a la calidad del agua de alimentación aumentan los costos de capital y operativos. Estos desafíos fomentan la exploración de técnicas de desalación electroquímica y de electromembrana para agua salobre. En tecnologías de electromembrana

como la electrodiálisis (ED) y la reversión de electrodiálisis (EDR), se utilizan membranas de intercambio iónico (IEM). Los IEM pasan contraiones (iones con carga opuesta a la de los grupos de carga fija de las membranas) pero bloquean los co-iones (iones con la misma carga que la de los grupos de carga fija de las membranas). En EDR, un campo eléctrico proporciona la fuerza impulsora para el transporte selectivo de iones a través de IEM y agua de desalinización (Ramírez, 2006).

La desionización capacitiva (CDI) es un proceso electroquímico emergente que implica la adsorción de iones en electrodos porosos bajo un campo electrostático y tiene la ventaja potencial de eliminar la necesidad de membranas y los pasos de pretratamiento asociados.

El CDI también se puede utilizar con IEM para mejorar la capacidad de adsorción, aunque con la desventaja de un potencial aumento de los requisitos de pretratamiento.

## **2.5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD**

Esta clase de ecuación se aplica a sistemas de abastecimiento de agua por gravedad, conforma la expresión analítica del principio de preservación de masa. Es la cantidad de flujo que circula en un sistema por unidad de tiempo, es decir la rapidez de flujo de un fluido; se puede manifestar a través de los tres términos que se definen a continuación.

Q es la rapidez es el volumen que circula por una sección por unidad de tiempo; W es la rapidez o velocidad de flujo de peso, es el peso de fluido que circula por una sección, por unidad de tiempo y M la rapidez o velocidad de masa, es la masa de fluido que circula

por una sección, por unidad de tiempo. El término de mayor preponderancia es  $Q$ , que se obtiene a través de la ecuación.

$$Q = Av$$

Donde:

- $A$  = área de la sección
- $v$  = velocidad promedio del flujo

Y las unidades de  $Q$ , surgen como se señala en la ecuación que se muestra a continuación.

$$Q = Av = L^2 * L/T = \frac{L^3}{T}$$

La rapidez o velocidad de flujo de peso,  $W$ , se vincula con  $Q$  a través de la ecuación que se muestra a continuación.

$$W = \gamma Q$$

Donde:

- $\gamma$  conforma el peso concreto del fluido, y
- las unidades de  $W$  conforman la ecuación.

$$W = \gamma Q = \frac{MLT^{-2}}{L^3} * \frac{L^3}{T} = \frac{MLT^{-2}}{T} = \frac{ML}{T^3}$$

La rapidez de flujo de masa,  $M$  se vincula con  $Q$  a través de la ecuación.

$$M = \rho Q$$

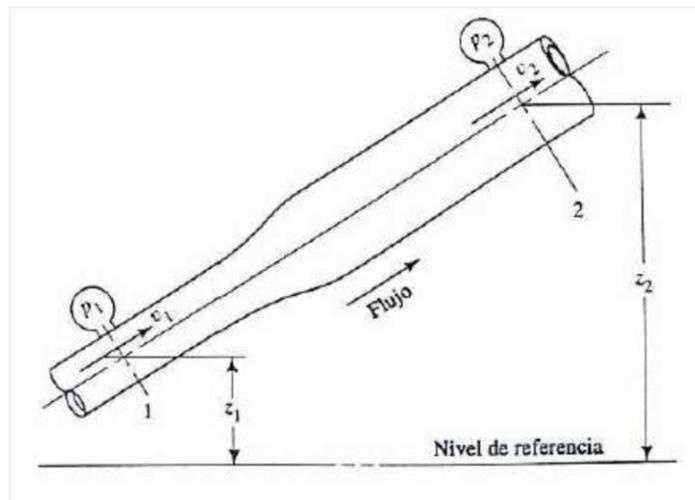
Donde

- $\rho$  conforma la densidad del fluido,
- y las unidades de  $M$  conforman la ecuación.

$$M = \rho Q = \frac{M}{L^3} * \frac{L^3}{T} = \frac{M}{T}$$

A continuación, en la Figura 3 se muestra la ecuación de continuidad contemplada en un tubo de corriente.

**Figura 3. Tubo de corriente para ecuación de continuidad**



Fuente: (Vásquez, 2011)

El método para determinar la velocidad de flujo de un fluido a través de un sistema de conductos cerrados, tiene que ver con el principio de continuidad. Según la figura anterior, un fluido pasa o circula de la sección 1 a la 2 con una rapidez constante, es decir, la cantidad de fluido que circula por cualquier sección en un determinado tiempo, es constante, por lo

tanto, se dice que existe un flujo constante; no obstante, si no se adiciona fluido, se acumula, se aísla o recoge entre la sección 2 en un determinado tiempo, debe ser igual que la que circula por la sección 1, durante el mismo tiempo este proceso, se puede manifestar en términos de la rapidez de flujo de masa como se señala en la ecuación a continuación.

$$M_1 = M_2$$

$$\text{Ya que } M = \rho Av$$

De donde:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Esta ecuación conforma un planteamiento matemático del principio de continuidad llamada ecuación de continuidad, la cual se usa para vincular la densidad del fluido, el área del flujo y la velocidad de flujo, a través de dos secciones de un sistema donde hay un flujo estable. Se utiliza con todos los fluidos, bien sea gases o líquidos.

Si el fluido que está dentro del tubo, conforma un líquido que se puede estimar como incompresible, los términos  $\rho_1$  y  $\rho_2$  de la ecuación son iguales; por lo tanto, la ecuación se expresa como se señala a continuación.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Y dado que:

$$Q = Av$$

Se tiene que:

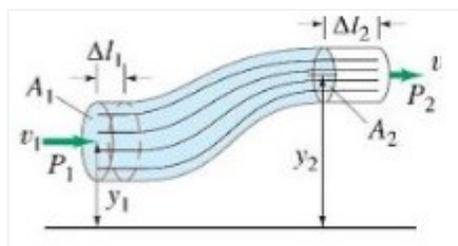
$$Q_1 = Q_2$$

Esta ecuación es la que se utiliza en líquidos: que instaure que, para un flujo estable, la rapidez de flujo de volúmenes es igual en cualquier sección. De igual manera, se puede usar con un pequeño error, en base de baja velocidad, lo que significa que sea menor que 100 m/s. (Vásquez, 2011)

## 2.6. ECUACIÓN DE BERNOULLI

Este principio explica el comportamiento de un fluido moviéndose a través de una línea de corriente, bajo este teorema se señala que en un fluido perfecto (sin viscosidad ni rozamiento) en un sistema de circulación a través de un conducto cerrado, la energía que posee dicho fluido se mantiene constante durante su recorrido. En un fluido que se encuentra en movimiento, la presión se supedita igualmente a la velocidad que tiene el fluido en cada punto. De hecho, si el patrón de velocidades del fluido no varía con el tiempo (esto se conoce como flujo estacionario) y la densidad del fluido sea casi constante (incompresible), la presión se reduce, y es en ese momento donde se incrementa la velocidad, a este proceso se le llama el principio de Bernoulli (Giancoli, 2006). A manera de ejemplo, se estima un tubo con distintas secciones y alturas, según lo señala la Figura 4 a continuación.

**Figura 4. Esquema de un flujo de fluido**



Fuente: (Forero, 2017)

Donde:

- $v_1$  = Velocidad de entrada
- $P_1$  = Presión del líquido en la sección de entrada
- $A_1$  = Área de la sección transversal de entrada
- $V_2$ ,  $p_2$  y  $A_2$  = Velocidad, presión del líquido y área de sección transversal de salida, respectivamente.

Si se deja pasar una fracción de tiempo  $\Delta t$ , el fluido que ingresa recorre una distancia  $\Delta l_1 = v_1 \Delta t$  a la entrada y una distancia  $\Delta l_2 = v_2 \Delta t$  a la salida. A causa de que el fluido es incompresible, el volumen del agua que ingresa al tubo, necesita ser igual al volumen que sale,  $A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$  y por lo tanto  $A_1 v_1 = A_2 v_2$ , que corresponde a la ecuación de continuidad para flujo estacionario; donde se infiere que, para un flujo incompresible  $vA$  conforma una constante.

Por su parte, la energía del agua se ha transformado. El incremento de energía potencial, se muestra según la ecuación.

$$\Delta E_p = \rho \Delta V g (h_2 - h_1) \text{ (Kariotoglou \& Psillos, 1993)}$$

Y el incremento de energía cinética resulta, como se muestra en la ecuación a continuación.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho \Delta V \left( v_2^2 - v_1^2 \right) \text{ (Martínez \& Pérez, 1997)}$$

Este incremento de energía requiere que sea igual al trabajo llevado a cabo por el resto del fluido sobre la parte del mismo que tuvo movimiento, es decir, por las presiones al ingresar y salir del tubo. Cuando ingresa el líquido, la fuerza que se ejerce está direccionada hacia el desplazamiento; en consecuencia, el trabajo que efectúa es positivo. Ocurre el caso contrario cuando el líquido sale del tubo, donde el trabajo que efectúa es negativo. De esta forma el trabajo total, se manifiesta como se señala en la ecuación a continuación.

$$\Delta W = F_1 \Delta X_1 = P_1 A_1 v_1 \Delta t - P_2 A_2 v_2 \Delta t = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V$$

Fusionando todo lo anterior, surge la ecuación que se muestra a continuación.

$$\Delta W = \Delta E_p + \Delta E_c \text{ (Becerril, et al., 2009)}$$

O sustituyendo,

$$P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = p \Delta V g (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} p \Delta V \left( v_2^2 - v_1^2 \right)$$

De donde se infiere que:

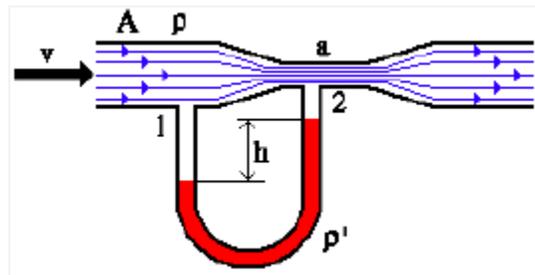
$$\frac{1}{2} p v_2^2 + p g h_2 + P_2 = \frac{1}{2} p v_1^2 + p g h_1 + P_1 \text{ (Tortosa & Torra, 2005)}$$

De esta forma surge el teorema de Bernoulli, que según Pihush, Cohen & Dowling (2011) se estima que conforma el teorema esencial de la mecánica de fluidos, en el momento en que se considera un fluido en equilibrio o proporción, la ecuación se puede determinar de la presión hidrostática. Dentro de los usos que tiene esta ecuación están el efecto Venturi, el funcionamiento de un atomizador, la sustentación del ala de un avión y el efecto Magnus.

- Efecto Venturi: Al observar el flujo por medio de un tubo, se puede estudiar que, si el tubo se encuentra horizontal, no se va a presentar modificación en la altura, y, además, es certero que la presión sobre esa línea horizontal es la misma. Teniendo en cuenta estas condiciones, la velocidad del fluido es inversa a la presión, y entre exista más velocidad del fluido, se generará menor presión en ese punto; de esta forma se reconoce el efecto Venturi (Burbano, et al., 2003).

A manera de ejemplo, y para observar el comportamiento del efecto Venturi, a continuación, se muestra la Figura 5.

**Figura 5. Esquema del tubo de Venturi**



Fuente: (Forero, 2017)

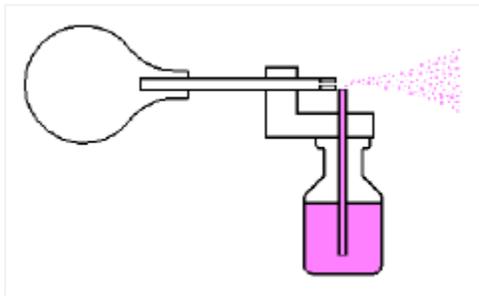
En dicha figura se observa un tubo que cuenta con una sección ancha en 1 y una sección delgada en 2. El líquido que atraviesa la sección 1 posee menor velocidad, que cuando pasa por la sección 2; aunque en la sección 1 existe mayor presión que en la sección 2. Una aplicación que tiene el tubo de Venturi es que sirve para medir caudales y velocidades de presiones entre dos puntos, en uno de los cuales existe un impedimento a la circulación.

La ecuación sería como se señala a continuación.

$$v_1 < v_2 \text{ y } P_1 > P_2$$

- Funcionamiento de un atomizador: En el atomizador existe una corriente de aire que ingresa por la parte superior del tubo vertical, la cual provoca una reducción de la presión con relación a la presión de la superficie del líquido, generando que el líquido suba por el tubo, gracias a la corriente que lo fracciona y lo dispersa (Pijush, et al., 2011). Esta aplicación se puede observar en la Figura 6 a continuación.

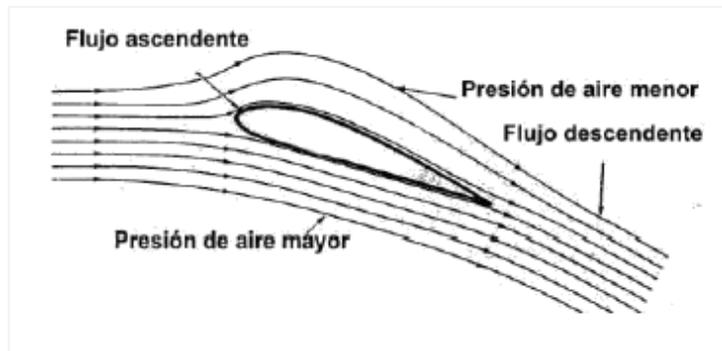
**Figura 6. Esquema de un atomizador**



Fuente: (Forero, 2017)

- La sustentación del ala de un avión: Los aviones soportan una fuerza neta que va dirigida hacia arriba, denominada fuerza de sustentación (Pijush, et al., 2011), y gracias a esta fuerza se mantienen en el aire. En la Figura 7 se muestra el esquema a continuación.

**Figura 7. Flujo de aire en un corte transversal de un ala de avión**



Fuente: (Forero, 2017)

Según la figura anterior, la fuerza es aplicada sobre las alas, basándose en agentes como la forma que tiene el ala, la velocidad del avión y el ángulo que existe con relación a las líneas del flujo de aire, posibilita que las líneas de corriente que están aplicadas sobre el ala, se acerquen, y las que van por debajo, se alejen; fundamentándose en el principio de Bernoulli este proceso produce una diferencia de presión que es menor por la parte de arriba del ala, que por debajo de la misma, lo cual permite que el avión vuele (Forero, 2017).

Una de las aplicaciones que tiene el principio de Bernoulli es para valorar las pérdidas de presión, y simular la distribución de caudales en cañerías y sistemas hidráulicos (Romero, et al., 2012)

## **2.7. AVANCES TECNOLÓGICOS PARA LA MEJORA EN LA OBTENCIÓN DE DATOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA**

De acuerdo con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) No. 6 de las Naciones Unidas, se busca respaldar los recursos, reservas y misión que tiene el agua y el saneamiento para todos los seres humanos (Ryder, 2018). El no poder tener acceso a utilizar agua limpia y a un saneamiento apropiado perjudica al ser humano en todas sus áreas, y los impactos que esto genera, son más fuertes para los países en vía de desarrollo y para las comunidades que se encuentran marginadas. Cerca del 36% de la población en el mundo se encuentra asentada en áreas donde no hay mucho flujo de agua, y una cifra superior a 2000 millones de seres humanos deben consumir agua contaminada. Se considera que la falta de agua generará el desplazamiento de más de 700 millones de seres humanos para el año 2030 (OMS - UNICEF, 2017). Aun así, existan estos peligros, la sociedad no se encuentra motivada para dejar de consumir menor cantidad de agua, preservar su calidad, ni conceder fondos para estos recursos (ONU- Banco Mundial, 2018).

Para poder cumplir con los objetivos de la ODS No. 6, el Panel de Alto Nivel sobre el Agua, convocó a efectuar “un cambio fundamental en la manera en que el mundo concibe y gestiona el agua”, y señaló además que de no tener precauciones sobre este aspecto, se podría generar un 40% en la falta de disponibilidad de este recurso fundamental para el ser humano para el año 2030 (ONU, 2016). Puesto que las respuestas tanto de financiación como tecnológicas habituales no han sido suficientes para solucionar estos retos, se requiere innovar en las respuestas para resolver las dificultades por la falta y por la calidad del agua en el mundo.

Gracias a los fundamentales desarrollos tecnológicos generados por la Cuarta Revolución Industrial (4RI) que han brindado mecanismos novedosos para estimular la evolución del cumplimiento de las metas establecidas en la Agenda 2030, Esta expresión 4RI denota tecnologías nuevas como lo son: La Inteligencia Artificial (IA), Big data y la Internet de las Cosas (IdC), blockchain, drones y realidad virtual y aumentada (RV(RA) entre otras.

De otro lado, actualmente no se pueden solucionar las dificultades que tiene este recurso, así como el saneamiento, a través de los sistemas habituales; estos recursos hídricos se siguen minimizando de la misma forma como viene incrementándose el nivel de población, aunado a ello están las dificultades en cuanto a la parte gubernamental en lo concerniente al sector del agua y las restricciones políticas que se imponen para la tramitología en las fronteras en cuanto a su uso. De igual manera, actualmente no son suficientes las inversiones efectuadas en cuanto a tecnología e infraestructura para este sector (Institute, 2017).

Estas dificultades se han presentado, a causa de que las tecnologías en el sector hídrico no han sido totalmente aplicadas con relación a lo que puede brindar la 4RI, aplicaciones que pueden colaborar en la generación de negocios, comunidades, ciudades y países inteligentes alrededor del universo. Dentro de las factibilidades que brinda la 4RI para enfrentar las dificultades que tiene el recurso del agua, están las que se señalan a continuación.

- Disponibilidad y misión sostenible de agua potable y saneamiento: (ODS 6.1 y 6.2)  
Cerca de 240 millones de seres humanos que viven principalmente en zonas rurales se pueden ver enfrentadas a quedarse sin poder acceder al agua limpia para el año 2050. De igual manera se estima que cerca de 1400 millones de seres humanos que

habitan principalmente en países en vía de desarrollo no podrán acceder a servicios básicos sanitarios para 2050; aspectos que han generado el requerimiento de utilizar tecnologías novedosas como IdC e IA, las cuales podrían brindar respuestas a fin de que los métodos de distribución puedan hacer llegar este recurso a las zonas que requieran mayor demanda. De igual manera, métodos de mercantilización entre pares, fundamentados en tecnología blockchain (la cual está siendo usada por granjeros en Australia) que se pueden utilizar para comprar y vender agua de forma directa, desde quienes la proveen a otros usuarios, minimizando la intervención de intermediarios, costos y demás dificultades.

- Tratamiento de aguas residuales, así como la calidad de este recurso (ODS 6.3): Se estima que la calidad de aguas superficiales en aquellas naciones en vía de desarrollo sufra bastantes perjuicios a causa de los flujos de nutrientes de las escorrentías que tiene la agricultura, además, se puede generar debido al mal estado de las plantas de tratamiento; de esta forma, se pueden provocar consecuencias que abarcan un elevado nivel de eutrofización, pérdida de biodiversidad y un incremento en las enfermedades de transmisión por el agua. La Inteligencia Artificial, así como sensores inteligentes y otra clase de tecnologías IdC, se están utilizando para la vigilancia de las plantas de tratamiento de residuos con el fin de desarrollar la utilización de los recursos y poder planificar el mantenimiento de los equipos en fundamento a los datos históricos.
- Eficiencia en la utilización del agua y estrés hídrico (ODS 6.4): Se considera que para el año 2050, 3900 millones de seres humanos, o lo correspondiente a una cifra superior al 40% de la población en el mundo, estarán supeditados a abastecerse de

cuencas fluviales con un enorme estrés hídrico. Se ha usado tanto la IA como los sensores inteligentes para determinar pérdidas de agua en estadios tempranos, minimizando así en un gran porcentaje estas pérdidas. Los métodos de comercialización entre pares fundamentados en blockchain y contratos inteligentes podrán estar siendo usados para mercantilizar de manera segura el sobrante de agua en los hogares.

- Ecosistemas fundamentados en el agua (ODS 6.6.): El número de seres humanos que puede estar siendo perjudicado por inundaciones en el mundo, se estima que se incrementará de 1200 millones en el año 2019 a 1600 millones en el año 2050 que corresponde a un porcentaje cercano al 20%. En este caso, se están usando tecnologías IA, IdC o los drones, para vigilar vías navegables y enormes depósitos de agua, acopiar multiplicidad de datos en tiempo real y valorar enormes zonas hídricas con mayor exactitud que con los sistemas habituales, en un tiempo y costo más reducido (Stankovic, et al., 2020).

A continuación, se describirán algunas de las nuevas tecnologías que deben ser consideradas aportantes para la evolución y obtención de datos que permitan un mejor aprovechamiento en el abastecimiento del agua.

### **2.7.1 Inteligencia Artificial**

Es aquella capacidad que tiene un sistema para descifrar de manera apropiada datos externos, aprender de éstos y usar lo aprendido para alcanzar objetivos y labores concretas a través de la adecuación flexible (Kaplan & Haenlein, 2018), es decir, que la IA hace alusión a máquinas (agentes) que procuran imitar la conducta humana, y se han generado para solucionar problemas concretos, mejor que el mismo hombre.

La enorme cantidad de usos que ha tenido la IA ha ido en aumento, con los avances en la capacidad de los computadores, la computación en la nube y la accesibilidad a los datos a través de mecanismos perfeccionados para el estudio de los datos (IQUI, 2017). De acuerdo con el Foro Económico Mundial (WEF), la Inteligencia Artificial brinda coyunturas para enfrentar los retos del medio ambiente a nivel mundial (Foro Económico Mundial, 2018). Esta Inteligencia Artificial conducida podría enfrentar los retos del cambio climático, la biodiversidad y la preservación, saneamiento en los océanos, la seguridad hídrica, el aire limpio y poder afrontar las catástrofes naturales.

A través de la IA se pueden generar “sistemas hídricos digitales” de mayor eficacia (World Future Energy Summit, 2019). Con relación a las inoperancias de los sistemas tradicionales que utilizan las empresas que abastecen el agua, se están tratando a través de métodos analíticos fundamentados en IA y están siendo potenciados por sensores de IdC; fusión que se utiliza para vigilar, pronosticar y solucionar los altos niveles de requerimientos de agua constantemente y de una forma más segura y sostenible (Guzmán, 2019). Este proceso se conoce como “gestión inteligente del agua”, es decir, “agua digital”

Esta manera de utilizar la IA, la posiciona en la nueva forma de trabajar por el agua. La capacidad de procesar que tiene este método, estudia concretamente lo que sucede en cada zona, y entre tanto, sus elementos de aprendizaje automático le posibilitan desarrollarse y saber cuál es la mejor forma de dar solución. La gestión inteligente del agua posibilita tanto a los gobiernos y entidades que proveen el recurso, cimentar y brindar infraestructura hídrica vigilada a través de una labor que no se fatiga, y se puede acoplar constantemente su forma de enfrentar cualquier dificultad.

Con estos sistemas se puede mejorar la relación costo-beneficio y la sostenibilidad de los procesos que existen actualmente para el abastecimiento de agua. Existen unos proyectos que ya están mostrando avances con la aplicación de este direccionamiento en Finlandia, como Silo. Al y Ramboll (Alanen, 2019). El método abanderado que utilizaron estas empresas fue cimentado sobre una infraestructura de IdC que ya existía para mejorar las operaciones habituales. Buscan generar sistemas de IA que tenga también participación del hombre, donde los componentes de IA dirigen el procesamiento de datos, permitiendo que los operarios puedan realizar tareas de conocimiento, como por ejemplo certificar y esclarecer el estudio del sistema IA.

Se utiliza este direccionamiento para el tratamiento de aguas al igual que en las ejecuciones de abastecimiento. La empresa hídrica de Australia Melbourne Water manifestó el triunfo que tuvieron los ensayos efectuados a través de su plataforma IA, que evalúa el mejor uso de sus bombas, sin requerir que interfiera el hombre en su ejecución; a través de este programa se espera que el método pueda aportarle a la empresa matriz para lograr ahorrar energía en un porcentaje superior al 20% (Wells, 2018).

Dentro de las oportunidades que tiene la aplicación de la IA en el sector del recurso del agua y el saneamiento para América Latina, es poder proveer datos que pueden respaldar la toma de determinaciones, como por ejemplo, los datos geoespaciales y de usuarios que pueden ser utilizados para determinar dónde se deben ubicar instalaciones de agua potable y saneamiento, para solventar los requerimientos de las comunidades más frágiles; de igual forma, los datos se pueden usar para entender las brechas que se generan entre la oferta y la demanda de agua, y poder determinar con el apoyo de estos sistemas donde se requiere con mayor necesidad abastecer este recurso (puede ser a nivel de la región, la comunidad o al interior de una empresa), también se pueden utilizar para instruir acerca de la mejor forma de gobernar y gestionar este recurso.

### **2.7.2. Internet de las cosas (IdC) y Big Data.**

Hace alusión a una red de crecimiento acelerado de mecanismos interconectados a la internet, los cuales se encuentran incorporados en los equipos tanto del hogar como del trabajo; ya que se pueden utilizar para desarrollar tareas concretas en diversas áreas, se encuentran conectados a través de la nube, y le otorgan respaldo tanto a las comunicaciones del hombre hacia los objetos como de éstos hacia el hombre.

De manera habitual, se estima que la puesta en marcha de IdC y Big data puede impactar en diversas atmósferas, e igualmente, llegar a nuevas probabilidades de uso. Con relación a la gestión que realizan estos mecanismos en el recurso del agua, se pueden utilizar para incrementar el uso eficiente de este recurso a través de nuevas respuestas para su desempeño. Los proyectos hídricos habitualmente son difíciles de manejar, puesto que diversas ciudades aún poseen vieja infraestructura; de tal forma que, la aplicación de estos

mecanismos, les puede brindar oportunidades de minimizar costos operativos relacionados con construcción y sostenimiento (Bellias, 2017). Puesto que las empresas del agua producen mucha información, para lo cual pueden aplicar el Big data para condensarla, y así brindar mejores soluciones en su tratamiento y toma de determinaciones.

Cuando se usan estudios de datos inteligentes fundamentados en la previa utilización de datos fusionados con modelos predictivos de flujo, aunado a lo cual se le adicionan datos en tiempo real de los niveles de agua, informes meteorológicos y flujo y presión del agua, se pueden determinar posibles sucesos problemáticos, y así enviar alarmas para llamar la atención acerca de factibles dificultades (Frankson, 2015).

El uso práctico de la IdC en la vigilancia ambiental, se puede observar en Brasil, el sistema para detectar la pérdida progresiva de tierra en la ribera de los ríos debido a las corrientes de agua llamado Alerta Ríos, proporciona datos completados en tiempo real de 30 entidades, posibilitando una formal organización y soluciones pertinentes (Mastrangelo, 2018).

Este método de alarma es sincronizado por el Centro de Operaciones de Rio, que conforma el primer centro de ciudades inteligentes en el mundo, que, a través de su eficaz sistema de vigilancia de lluvias y radares meteorológicos, posibilita prever desastres naturales (Mastrangelo, 2018).

Con relación al manejo de los recursos hídricos, las ejecuciones de las cuencas fluviales se pueden mejorar y la contaminación del agua subterránea se puede tasar, e igualmente, los niveles de aguas tanto residuales como de alcantarillado. Así mismo, se puede mejorar la gestión del agua dentro de las cañerías, usando sensores GPS que posibiliten

vigilar los parámetros hidráulicos y químicos, al igual que ubicar posibles pérdidas (Diodlo, 2012).

De acuerdo con lo anterior, un mejor desempeño del agua puede respaldar el enfrentar otras dificultades que tienen que ver con la falta de este recurso. Un ejemplo, es la empresa brasileña GHydro que brinda servicios de trámite del agua y vigilancia de pozos artesianos (Stankovic, et al., 2020) y telemetría de líquidos. Esta empresa trabaja en lo concerniente al hardware a través de la provisión de sensores compactos que se relacionan por medio de tecnología GPRS, y se encargan de medir presión, volumen, conductividad y temperatura del agua, entre otras. De igual forma, existe en Uruguay la Fundación CTAguá, que conforma el primer centro tecnológico de esta clase en América Latina (Mastrangelo, 2018). Esta empresa incorpora tanto IdC como Big data para enfrentar las dificultades del agua y el saneamiento en todo el país.

De otra parte, las oportunidades de poner en marcha la IdC a gran escala generarán efectos en el sector hídrico, puesto que permitirá optimizar la utilización eficiente del agua, desarrollará la gestión del agua y minimizará los costos operativos de las empresas del sector. También puede ayudar a respaldar la calidad del agua, puesto que se pueden ubicar sensores en los cuerpos de agua para acopiar datos acerca del flujo, calidad y cantidad de ésta; información que puede ser pasada por medios de mecanismos unidos a la IdC. Los sensores que se conectan a la IdC posibilitan a las personas que toman las determinaciones establecer, por ejemplo, dónde y cómo las vías acuáticas están contaminadas por plantas de tratamiento de aguas, o a causa de la eutrofización por las escorrentías agrícolas y darle relevancia y soluciones apropiadas (Stankovic, et al., 2020).

### **2.7.3. Blockchain.**

Esta es una tecnología usada para generar una base de datos compartida, en la cual se pueden inspeccionar e indagar contratos y activos. No se encuentra direccionado por alguien específico, sino que puede tener acceso todo el público, o grupos de personas que tengan los permisos otorgados. La cadena de bloques que lo conforman, se renueva con cada transacción efectuada, por lo tanto, quienes lo utilizan pueden ver las actividades permanentemente de cada cadena de bloques. Después de que se ha subido información a la base de datos, no se puede eliminar ni cambiar.

Gracias a que se provee un registro respaldado, claro y compartido donde se estipulan las transacciones entre partes, la tecnología fundamentada en blockchain podría cambiar la forma en que se tramitan y mercantilizan los recursos hídricos. De esta forma, cualquiera, bien sea un usuario de una residencia, un consumidor industrial o el gerente de una empresa de agua, o hasta un político puede ingresar a observar los datos acerca de la calidad y cantidad de agua; y con ello puede tomar las mejores determinaciones. Por ese nivel de claridad en la información, le puede respaldar a los consumidores determinar cuándo utilizar o no el agua. Así mismo, con esta tecnología se puede hacer más sencillo la mercantilización P2P de derechos sobre el agua, invistiendo autoridad al usuario que cuenten con suficientes recursos o que quieran compartir con otros usuarios de su zona el exceso del agua a realizarlo en cualquier momento (Stankovic, et al., 2020).

De acuerdo con el direccionamiento claro y en tiempo real del trámite del agua posibilitaría reducir las incertidumbres que se pueda presentar en determinadas localidades, a través de la liberalización de poder acceder a la información y previsión de la operatividad

de los datos. Por ejemplo, Power Ledger, primera empresa en utilizar blockchain para el sector hídrico que realiza en la ciudad de Fremantle labores que tienen que ver con la generación de un método de mercantilización fundamentado en blockchain que se alimenta con datos de medidores inteligentes de agua (Ledger, 2018).

De igual manera, la utilización de la tecnología blockchain se puede emplear para generar y desarrollar sistemas de tratamiento de agua. La empresa Origin Clear es un abastecedor de tecnología de tratamiento de agua que se ha encargado de generar un protocolo llamado Water Chain, cuyo propósito es producir un medio que posibilite mejorar la calidad del agua a nivel mundial, minimizando así la cantidad de muertes por motivos de malas condiciones de sanidad de ésta. Esta plataforma, posibilita a quienes invierten en ella, conseguir vales para subvencionar proyectos de reciclaje de agua, y a cambio poder recibir un rendimiento; de tal forma que Origin Clear busca generar nuevas oportunidades de financiamiento para las empresas de tratamiento de agua.

Esta aplicación de blockchain, según Russel (2017) conforma un registro público, respaldado, conciso y compartido entre las partes, al utilizarlo para inventariar la calidad y cantidad de este recurso. La información que se incorpora en blockchain, no se puede ocultar ni modificar por parte de ninguna entidad, persona o gobierno mismo; las características que tiene esta clase de tecnología le han dado la posibilidad de poder acceder a la información y direccionar de una mejor forma todos los trámites referentes al agua en tiempo real. Los datos acerca de la calidad y cantidad de agua, se pueden usar para tomar determinaciones más útiles, y sobre todo en esta época donde está faltando cada vez más este recurso (Stankovic, et al., 2020).

#### **2.7.4. Sistemas de Teledetección**

Este mecanismo o vehículo aéreo no tripulado (VANT), se denominan de esta forma para determinar vehículos que vuelan y que son dirigidos de manera remota a través de sensores y navegación por GPS. Inicialmente, tuvo un uso militar, en labores de inteligencia, vigilancia y reconocimiento, Aunque la utilización militar que se dio con este sistema fue para la segunda mitad del siglo XX (Sandvik, 2017), actualmente se utiliza cada vez más en el entorno civil, comercial y recreativo (Washington, 2018).

Esta clase de mecanismo, puede aportar en la resolución de muchos temas que tienen que ver con la irregularidad de la información y falta de datos en los países en vía de desarrollo. Las capacidades y técnicas que tienen estos sensores remotos son apropiadas para vigilar las precipitaciones a escala regional, los presupuestos de agua, la humedad del suelo y ciertos factores de calidad del agua. Al fusionar las habilidades que tienen los sensores remotos con las imágenes satelitales, se pueden hacer factibles la particularización de la cuencas, la vigilancia de la calidad del agua, la valoración de la humedad del suelo, la vigilancia en cuanto a la extensión y el nivel del agua, la vigilancia de los servicios de irrigación, la modelización de la demanda de agua para uso tanto urbano como agrícola, la gestión de aguas subterráneas, la modelización hidrológica; e igualmente, el mapeo y pronóstico de inundaciones (Andrés, 2018). Esta clase de tecnología la ha usado el satélite europeo Sentinel-1 para valorar los volúmenes de agua que vienen siendo represados en pequeños depósitos para evaluar la factibilidad de los pequeños métodos de suministro de agua en países subdesarrollados (Andrés, 2018).

La utilización de la tecnología VANT referente al recurso del agua, ha sido de mayor impulso, gracias a las propiedades de cambio en las normas de vigilancia y mantenimiento, dándole valor comercial y exactitud en los datos de ingeniería. A través de los drones, se puede vigilar cañerías, cruces de alcantarillas, uniones y vigas, lo cual permite evitar acarrear gastos en cuanto a la vigilancia por el acceso manual a estos sitios (Williams, 2018).

La colocación de scanner LiDAR a los drones para generar modelos 3D de activos y terrenos, les brinda a las entidades una vista en tiempo real y bastante precisa en activos y topografías. La empresa Anglian Water utilizó drones que contaban con sistemas de imágenes térmicas con el fin de ubicar pérdidas, puesto que las cámaras térmicas detectan las diferencias de temperatura en los sitios donde el agua se filtra, y la tierra que los circunda.

Los drones pueden ubicar exactamente filtraciones pequeñas, reduciendo así las labores de excavación e interrupción del servicio, con el uso de esta tecnología, unida a la capacidad de rastrear que posee el GPS, pueden detectar zonas de dificultades, y en seguida enviar la información visual y termográfica de alta definición a un equipo de vigilancia (Williams, 2018).

Con el uso de los drones se puede mejorar la exactitud de las predicciones de calidad del agua y minimizar la cantidad de seres humanos que se necesita para recoger muestras. El Concejo de Auckland se fusionó con Pattle Delamore Partners, una empresa de consultoría ambiental y de ingeniería de Nueva Zelanda para generar una metodología de muestreo de aguas, estas muestras se recogen en diversos sitios que están retirados hasta un kilómetro de la costa, a través de drones que introducen bolsas y recogen el agua; posteriormente de los estudios efectuados en laboratorios, los resultados se les transmiten al sistema de rastreo de

agua del concejo, práctica que permite incrementar la exactitud en los datos predictivos acerca de la calidad del agua, y que además minimiza los costos operativos para la ciudad (Aquatech, 2019)

De acuerdo con Saad (2016), ya que la gestión de los recursos hídricos (GRH) es un reto a nivel mundial, el desarrollo de la utilización de imágenes por satélite se conformaría en una solución de mayor aplicabilidad. Los drones no cuentan con escalabilidad para ciertos usos, como por ejemplo el poder abarcar grandes áreas agrícolas o depósitos de agua; entre tanto, los mecanismos sensores de los satélites brindan un panorama único acerca de las mediciones directas e indirectas de la gran mayoría de elementos en el ciclo hídrico. Ya que se ha incrementado la cifra de lanzamientos de satélites en el mundo, la información satelital que brindan respalda y desarrolla la GRH en el mundo; esto puede palpase en los beneficios que otorgan los sensores remotos, puesto que las imágenes satelitales pueden otorgar información de manera permanente y vigilada sobre la calidad del agua, reduciendo y constatando de donde surgen los agentes contaminantes que son bastante dañinos para el ser humano, así como para la parte acuática.

De igual manera, señala Sheffield, et. al (2018) que los sensores remotos de los satélites pueden brindar información necesaria para respaldar la tarea que cumple el agua, y la vigilancia del desarrollo de los riesgos y sus potenciales efectos, aunque estos sensores se están utilizando de manera primaria, y tienen aún muchas restricciones en el entorno de la GRH. El revestimiento espacial que tienen y las determinaciones temporales que brindan permiten que puedan otorgar información casi a escala global de manera virtual en tiempo real.

### **2.7.5. Realidad virtual y aumentada.**

Tanto la Realidad Virtual (RV) como la Realidad Aumentada (RA) se pueden transformar en la futura plataforma de computación, ya que provocan una interrupción en los mercados, además de que generan mercados novedosos.

La realidad virtual conforma una “interfaz intuitiva” que se encuentra incorporada a modernos mecanismos de entrada y salida que le posibilitan al individuo interactuar con el aparato de computación y con los datos, de una manera realista a través de la concepción de experiencias de muchas sensaciones en tiempo real, ubicadas de forma artificial, impulsadas por un entorno virtual y de tres dimensiones, provocado por la computadora (Dieck & Jung, 2019). Puede incorporar a la persona en un mundo de imaginación como por ejemplo videojuegos, películas o simulacros de vuelo; o, por ejemplo, hacer que la persona experimente un evento deportivo en vivo, es decir, fingir su presencia en el mundo real; después de que se ve incorporado en esa situación, la persona puede interactuar con los objetos dentro del entorno virtual y que las imágenes que se encuentran abiertas se restablezcan para efectuar una correspondencia entre el usuario y la figura.

Los entornos virtuales tridimensionales (3D) permiten posibilitar el bosquejo conceptual y el entendimiento, al brindar una vista previa de un bosquejo inicial, y, además, posibilitar que se pueda ensayar en escala según lo plantea quien la observa. Esta clase de tecnología, ha sido usada en diversos campos como el entrenamiento médico militar, salud, educación y en diversos usos de ingeniería (Wu, et al., 2012).

En cuanto a los usos de la realidad aumentada (RA), se fundamentan en la capacidad que tiene una cámara de percibir datos del mundo real y fusionar la información que viene

de fuentes reales y virtuales; brindando así, una interpretación aumentada de la verdadera realidad, a través de la adición de una información digital, de tal forma que juntas aparentan constituir una unidad sólida (Dieck & Jung, 2019).

En el mundo cada vez existe mayor disponibilidad de datos, así mismo Big data, se puede transformar en un mecanismo difícil de tramitar y estudiar; por lo tanto, se plantea el requerimiento de poner en marcha sistemas de observación para componer información que es complicada; e igualmente, depurar datos esenciales para requerimientos concretos (Mannschatz, 2015). Estos dos tipos de realidades, se pueden utilizar como interfaces de sencilla aplicación para posibilitar a empleados y especialistas entender la información adquirida y tomar las mejores determinaciones.

En cuanto a las redes de distribución de agua (RDA) se pueden ver favorecidas, gracias a esta clase de aplicaciones. Estas RDA son redes de diversas fuentes de agua y plantas de tratamiento que abarcan secciones de cañerías, fuentes de agua, cisternas, estaciones de bombeo y válvulas (Wu, et al., 2012). Según Loucks<sup>2</sup>, todo individuo que tenga implicación de cierta forma con la proyección y direccionamiento del agua, probablemente está comprometida y favorecida por sistemas de computación. La representación del suministro y adjudicación del agua, se aplica para observar toda la información de los métodos de distribución; además para modelar los ambientes de operación hídrica desde las fuentes de agua, hasta que llega al usuario final. Quienes se encargan de ese proceso de modelación, requieren proporcionar tanto a quienes planifican como a los gerentes la información veraz, entendible, útil, concreta y apropiada, con el fin de poder respaldarlos en

el mejor entendimiento del sistema que tienen a su cargo, así como las dificultades y las mejores opciones de poder enfrentarlas (Loucks, 2019).

Aunque los métodos habituales de simulación de RDA observan los resultados por medio de plataformas bidimensionales, textos y tablas que no son muy entendibles por aquellos que no cuentan con un conocimiento profesional y experiencia en métodos de distribución de agua. Los nuevos métodos de modelización actuales, están bastante restringidos con relación a los diversos procesos interdependientes físicos, bioquímicos, ecológicos, sociales, legales y políticos que se encargan de dirigir la ejecución de los sistemas de recursos hídricos (Loucks, 2019). Estas tecnologías se pueden fusionar con simulaciones de avanzada, con el fin de determinar acciones que sirvan y que requiere el personal que tiene la responsabilidad de calcular costos. A través de las novedosas tecnologías para realizar visualización geoespacial, y que son las adecuadas para quienes están encargados de tomar determinaciones, deben usar infraestructura automatizada que permita fusionar datos a visualizaciones interactivas. De esta forma, estas aplicaciones tendrían que posibilitar generar datos, bien sea históricos los cuales pueden ser conseguidos por sensores ambientales o que sean resultado de modelos que deben ser incorporados permanentemente, tanto de manera manual como automática por sensores de datos o teléfonos móviles (Mastrangelo, 2018)

Un ejemplo de quienes han desarrollado esta clase de realidades es Wu, Gao y Chang en el año 2012, quienes generaron un método de simulación de ambientes para Redes de Distribución de Agua con un grupo de mecanismos integrado denominado EPANET, que conforma una aplicación de software usada en el mundo para la modelización de sistemas de

distribución de agua, fue creada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) como mecanismo para entender el movimiento y el destino de las partes que conforman los métodos de distribución; este sistema de simulación se creó para incrementar el cumplimiento y mejorar los servicios de las empresas de agua y ayudarlas a minimizar los costos operativos.

Este estudio, según Wu, Gao & Chang (2012) incorporó un método de simulación de RV integrando modelos hidráulicos y de calidad de agua, posibilitando la producción de operación de RDA en tiempo real; por medio de este sistema, los usuarios pueden observar un entorno hidráulico dinámico y transformador en entornos virtuales en tercera dimensión, y efectuar operaciones como el cambio de los programas de las bombas, efectuar una simulación por largas etapas, o acopiar información acerca del consumo de energía de las bombas, niveles en las cisternas, caudal de flujo en las cañerías. Este concepto también se puede utilizar para ser fusionado con otros modelos que tienen que ver con sistemas urbanos de agua, como aquellos que revisan las pérdidas o de colaboración a las empresas de agua para entender la complejidad de los sistemas hídricos de una ciudad, así como dirigir sus operaciones diarias y también otorgar capacitación al personal encargado (Stankovic, et al., 2020)

### 3. CONCLUSIONES

Los modelos hidrológicos y la utilización de los métodos de apoyo para la toma de determinaciones, se han transformado en los mecanismos claves para la proyección y argumentación de toda acción ejecutada en el entorno de la gestión de los recursos hídricos. El auge de estos mecanismos, se ha debido no únicamente a su capacidad computacional que posibilita llegar donde un equipo de trabajo no llegaría jamás, gracias a la mejora tecnológica de estos mecanismos que son cada vez de mayor accesibilidad.

La evolución tecnológica que han presentado las computadoras, ha posibilitado el avance de software de gran avanzada, que constituyen un aporte fundamental al sector de recursos hídricos. Esta clase de software han sido generados por entidades dedicadas a la indagación, al igual que la intervención de distintos organismos a nivel internacional que buscan mejorar las probabilidades de aprendizaje para poder llegar a respuestas en las dificultades tanto sociales como económicos y ambientales, todo esto a través de la mejor aplicabilidad ofrecida por las distintas tecnologías computacionales que permiten utilizarlas en pro del mejor desarrollo del modelado hídrico

La herramienta tecnológica conforma una metodología que posibilita incorporar un modelo hidrológico, un método de información geográfica y programas computacionales, con el fin de generar información acerca de la disponibilidad de recursos hídricos que permitan una mejor distribución de este componente natural en toda la humanidad. Los resultados que surgen gracias a los mecanismos tecnológicos, se pueden adaptar a modelos locales hidrológicos cuyo propósito sea la toma de determinaciones acerca de la disponibilidad de este recurso.

De esta forma, es necesario que las autoridades ambientales competentes, puedan contar tanto con los recursos computacionales como con el total conocimiento del manejo de los mismos para ser aplicados en el desarrollo de los recursos hídricos; para de esta forma, poder tener mayor certeza y confiabilidad en los datos que son utilizados tanto para el estudio como para la toma de determinaciones con relación a la administración y manejo de este recurso hídrico.

La nueva tecnología es el mecanismo apto para la gestión de datos del agua, la cual debe estar desarrollada para la articulación de nuevas variables e integración de procesos de estudios, que sean utilizados para la formulación de evaluaciones tanto a nivel regional, nacional o mundial, planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, planes de ordenamiento del recurso hídrico e investigaciones generales que tengan relación con este recurso fundamental para la vida del ser humano.

De otra parte, también es fundamental señalar la trascendencia que tiene el hecho de contar con los mejores medios para poder captar toda la información y los datos pertinentes para el buen desempeño en la consecución y muestra de la información recolectada. La recolección y el análisis de datos, son esenciales para comprender y desarrollar las mejores soluciones a las problemáticas hídricas que se presentan a nivel mundial, los datos precisos y actualizados pueden respaldar la evaluación y monitoreo que se le dé a las diferentes situaciones que surjan a causa de la problemática de escasez con el recurso hídrico en el mundo; ya que la gestión y el desarrollo integral de los recursos hídricos buscan respaldar una utilización óptima y sostenible del agua para el desarrollo tanto económico y social, mientras se protege y mejora el valor ecológico del ambiente.

De esta forma, cabe señalar que a nivel mundial se hace necesario tener una excelente tecnología que permita la generación de los datos más precisos para enfrentar y combatir la escasez de este preciado líquido, para lo cual se deben aplicar un conjunto variado de metodologías, tecnologías y técnicas, que posibiliten la consecución de datos concretos, actuales y reales, con el fin de desarrollar esquemas de ordenación y reglamentación en cuanto al uso del agua que maximicen el bienestar social y económico de forma equilibrada, sin necesidad de comprometer la sostenibilidad ambiental, unido al requerimiento de mantener el recurso para las futuras generaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu, A. y otros, 2016. Real-time dynamic hydraulic model for potable water loss reduction.

*Procedia Eng*, 154(7), pp. 99-106.

Alanen, P., 2019. *How Artificial Intelligence is Transforming the Water Sector: Case*

*Ramboll*. [En línea]

Available at: <https://silo.ai/how-artificial-intelligence-is-transforming-the-water-sector-case-ramboll/>

Andrés, L. e. a., 2018. *A Review of In-Situ and Remote Sensing Technologies to Monitor*

*Water and Sanitation Interventions*. [En línea]

Available at: <https://www.mdpbi.com/2073-4441/10/6/756/pdf>

Aquatech, 2019. *Drones Reduce Water Quality Sampling Costs in Auckland, New Zealand*.

[En línea]

Available at: <https://smartwatermagazine.com/news/aquatech/drones-reduce-water-quality-sampling-costs-auckland-new-zealand>

Argudo, J., 2019. Gestión del agua en distintas civilizaciones: De Grecia a la actualidad.

*Energía & Minas, Revista Profesional Técnico y cultura de los Ingenieros Técnicos de Minas*, Issue 15, pp. 60-75.

Arnold, U., Datta, B. & Haenscheid, P., 2009. Sistemas inteligentes de información

geográfica (IGIS) y modelado de aguas superficiales. *IAHS Publ*, pp. 407-416.

- Arteaga, M., 2017. *Evaluación del modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar*. Perú: Escuela Politécnica Nacional.
- Bachini, E., Fent, I. & Putti, M., 2019. Incluyendo efectos topográficos en el modelado de aguas poco profundas. *Seminario Dottorato 2018/19*, pp. 121-143.
- Balaguer, D. & Navarro, C., 2016. *El trabajador social en la defensa del derecho al agua: un llamamiento a la RSC. In Respuestas transdisciplinarias en una sociedad global: Aportaciones desde el Trabajo Social*. Logroño, España: Universidad de La Rioja.
- Banco Mundial, 2012. *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Sistema Nacional de Información Para La Gestión Del Riesgo de Desastres*. [En línea] Available at: <https://doi.org/333.3109861/A56>
- Banco Mundial, 2016. *Los objetivos de desarrollo en una era de cambio demigráfico*. Washington: Banco Mundial.
- Becerril, J., Hernández, O., Flóres, S. & Trejo, L., 2009. *Estudio experimental de la relación presión vs temperatura a volumen y cantidad de sustancia constantes para aire*, Barcelona: VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias.
- Bellias, M., 2017. *IoT for water utilities*. [En línea] Available at: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-for-water-utilities/>

- Bingner, R. & Theurer, F., 2014. *AnnAGNPS: estimating sediment yield by particle size for sheet and rill erosion*. Reno, Nevada: Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March 25 to 29, 2014, Reno, Nevada.
- Bosch, P. & Recio, I., 2014. Calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto El Gato TT. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental TA* -, 35(1), p. 101–115.
- Burbano, S., Burbano, E. & Gracia, C., 2003. *Física General 32a. Edición*. Madrid: Tébar Flores .
- Burneo, S., Delgado, R. & Vérez, M., 2016. Estudio de factibilidad en el sistema de dirección por proyectos de inversión. *Ingeniería Industrial*, 37(3), pp. 305-312.
- Cama, A. y otros, 2016. Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), pp. 581-599.
- CAR, 2015. *Guía técnica para la adecuación hidráulica y restauración ambiental de corrientes hídricas superficiales*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.
- Cárdenas, M. & Alejandro, C., 2008. *Comparación y análisis de metodologías de calibración del modelo lluvia-escorrentía, SWMM, en cuencas urbanas - caso ciudad de Girardot*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Carmenates, D. y otros, 2016. Simulación de obturaciones en emisores mediante la modelación matemática en los sistemas de microirrigación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 25(4), pp. 17-22.
- Cavalli, L., 2017. *Derecho de aguas*. Buenos Aires: Universidad de Belgrano.
- Celeste, A., Curi, W. & Curi, R., 2009. Implicit stochastic optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil. *Pesquisa operacional*, 29(1), pp. 223-234.
- Cristancho, R., 2018. *Modelación computacional de mezcla de cloro residual en agua para nudos en redes de distribución de agua potable utilizando CFD*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- de Macêdo, J., 2017. Comparativo entre os métodos heurísticos. *ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, pp. 1-8.
- Dieck, T. & Jung, M., 2019. *Augmented Reality and Virtual Reality*. [En línea] Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-030-06246-0>
- Diodlo, N. e. a., 2012. *Potential applications of the Internet of Things in sustainable rural development in South Africa*. [En línea] Available at: [https://www.researchgate.net/publication/258446246\\_Potential\\_applications\\_of\\_the\\_internet\\_of\\_Things\\_in\\_sustainable\\_rural\\_development\\_in\\_South-Africa](https://www.researchgate.net/publication/258446246_Potential_applications_of_the_internet_of_Things_in_sustainable_rural_development_in_South-Africa)
- DNP, 2018. *3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014*. [En línea]

Available at: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-d>

El-Sammany, M. & El-Moustafa, A., 2011. Adaptation of surface water modeling system for sediment transport investigations in Lake Nasser. *Journal of Nile Basin Water Science and Engineering*, 4(1), pp. 71-85.

ENA, 2018. *Reporte de Avance del Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.

Espín, P., 2014. *Gestión de activos. Sistema de gestión integral para empresas de abastecimiento de agua*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Feria, D., Rubi, D. & Delgado, D., 2017. Tratamientos para la remoción de antibacteriales y agentes antimicrobiales presentes en aguas residuales. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), pp. 43-62.

Forero, J., 2017. *Desarrollo cualitativo de los conceptos básicos de la mecánica de fluidos Una aproximación al principio de Bernoulli*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Foro Económico Mundial, 2018. *Harnessing Artificial Intelligence for the Earth*. [En línea] Available at: [http://www3.weforum.org/docs/Harnessing\\_Artificial\\_Intelligence\\_for\\_the\\_Earth\\_report\\_2018.pdf](http://www3.weforum.org/docs/Harnessing_Artificial_Intelligence_for_the_Earth_report_2018.pdf)

Frankson, L., 2015. *Big Data Analytics for Better Management of Water Networks*. [En línea] Available at: <https://infrastructurenews.co.za/2015/09/07/big-data-analytics-for-better-management-of-water-networks/>

García, C., 2017. *Análisis termodinámico de procesos de desalación de agua de mar basados en ósmosis directa*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Gaushell, D. & Darlington, H., 2007. Supervisory control and data acquisition. *Proceedings of the IEEE*, 75(12), pp. 1645-1658.

Giancoli, D., 2006. *Física: Principios con aplicaciones..* Naulcalpan de Juárez: Editorial Perason educación de México.

Guzmán, H., 2019. *Digital Water Transformation: The Promise of Artificial Intelligence*. [En línea]

Available at: <https://medium.com/datadriveninvestor/digital-water-transformation-the-promise-of-artificial-intelligence-7d88fb07e79b>

IDEAM, I. d. H. M. y. E. A., 2011. *Diagnostico situacion de riesgos hidrometeorologicos en Colombia y Avances en la Zonificación de Riesgos*. 1 ed. Bogotá: IDEAM.

Institute, R. f. D., 2017. *Challenge funds and innovation in the water sector: A report to the high-level panel on water*. [En línea]

Available at: [https://sustainabledevelopmentun.org/content/documents/153732\\_HLPW\\_Final\\_Report\\_pdf\\_3.pdf](https://sustainabledevelopmentun.org/content/documents/153732_HLPW_Final_Report_pdf_3.pdf)

IQUI, 2017. *Artificial Intelligence: The Current Market, Technology, and the Most Promising Applications for Companies*. [En línea]

Available at: <https://medium.com/iqiii/artificial-intelligence-the-current-market-technology-and-the-most-promising-applications-for-1717e680040b>

- Kaplan, A. & Haenlein, M., 2018. *Siri, Siri in my Hand, who's the Fairest in the Land? On the Interpretations, Illustrations and Implications of artificial intelligence*. [En línea] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007681318301393>
- Kariotoglou, P. & Psillos, D., 1993. Pupils' pressure models and their implications for instruction. *Research in science & technological education*, Volumen 11, pp. 95-108.
- Kirschke, S., Newig, J., Völker, J. & Borchardt, D., 2017. Does problem complexity matter for environmental policy delivery? How public authorities address problems of water governance. *Journal of environmental management*, 196, pp. 1-7.
- Langsdale, S. y otros, 2007. An exploration of water resources futures under climate change using system dynamics modeling. *Integrated Assessment Journal*, pp. 51-79.
- Ledger, P., 2018. *Project Update: Fremantle Smart City Development*. [En línea] Available at: <https://medium.com/power-ledger/project-update-fremantle-smart-city-development-b16ccce2eb8>
- Lingling, Z., Weirong, W. & Zongzhi, S., 2012. The Simulation of Regional Water Use Behavior Based on System Dynamics: a Case Study in Jiangsu Province. *Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII), 2012 International Conference*, pp. 403-406.
- Li, Q. y otros, 2016. Multifísica COMSOL: un enfoque novedoso para el modelado de aguas subterráneas. *Groundwater*, 47(4), pp. 480-487.

- Li, R. y otros, 2018. An improved shuffled frog leaping algorithm and its application in the optimization of cascade reservoir operation. *Hydrological Sciences Journal*, 63(15-16), pp. 2020-2034.
- Liu, J. y otros, 2018. Urban Storm Water Modeling and Analysis Based on SWMM LID Modules. *Journal of Water Resources Research*, pp. 182-189.
- López, A. & Hernández, D., 2017. Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(332), pp. 459-496.
- Loucks, D., 2019. *Water Resource Management Modeling in 2050*. [En línea] Available at: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784412077.ch36>
- Mannschatz, T. e. a., 2015. *Visualization of Water Services in Africa: Data Applications for Nexus Governance*. [En línea] Available at: [https://www.researchgate.net/publication/26855148\\_Visualization\\_of\\_Water\\_Services\\_in\\_Africa\\_Data\\_Applications\\_for\\_Nexus\\_Governance](https://www.researchgate.net/publication/26855148_Visualization_of_Water_Services_in_Africa_Data_Applications_for_Nexus_Governance)
- Martínez, J. & Pérez, B., 1997. Estudio de propuestas alternativas en la enseñanza de la termodinámica básica. *Revista Enseñanza de las Ciencias*, 15(3), pp. 287-300.
- Martin, O., 2010. *Modelado y Simulación de un Sistema Hidráulico*. Cali: Universidad San Buenaventura.
- Maryam, B. & Büyükgüngör, H., 2017. Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: Opportunities and challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 30.

Mastrangelo, P., 2018. *Water and Sanitation: Innovations You Didn't Know Were from Latin America and the Caribbean*. [En línea]

Available at: <https://publications.iadb.org/en/water-and-sanitation-innovations-you-didnt-know-where-latin-america-and-caribbean>

McDonald, R., Bennett, J. & Nelson, J., 2018. The USGS multi-dimensional surface water modeling system. *Proceedings, 7th US Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nev.*, pp. 161-167.

Menges, C., Taylor, E., Workman, J. & Jayko, A., 2011. Regional surficial-deposit mapping in the Death Valley area of California and Nevada in support of ground-water modeling. Quaternary and Late Pliocene Geology of the Death Valley Region. En: *Quaternary and Late Pliocene Geology of the Death Valley Region: Recent Observations on Tectonics, Stratigraphy, and Lake Cycles (Guidebook for the 2001 Pacific Cell—Friends of the Pleistocene Fieldtrip)*. Los Angeles: Open-File Report, pp. 151-166.

Mora, D., Gutierrez, J., Iglesias, P. & Martínez, F., 2017. Mora-Melia, Daniel, et al. "Determinación del tamaño de población inicial más eficiente en el dimensionado de redes de agua mediante algoritmos meta-heurísticos (Choice of the Most Efficient Population Size in Meta-Heuristic Algorithms Applied to Pipe Siz. *Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks* , pp. 1-8.

Nazemi, A. & Wheeler, H., 2015. On inclusion of water resource management in Earth system models--Part 2: Representation of water supply and allocation and

opportunities for improved modeling. *Hydrology & Earth System Sciences*, 19(1), pp. 63-90.

Nazemi, A. & Wheater, H., 2015. On inclusion of water resource management in Earth system models--Part 2: Representation of water supply and allocation and opportunities for improved modeling. *Hydrology & Earth System Sciences* 19.1, pp. 64-91.

OMS - UNICEF, 2017. *Progress on drinking water, sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines*. [En línea]  
Available at: <https://www.who.int/mediacenter/news/releases/2017/launch-version-reportjmp-water-sanitation-hygiene.pdf>

OMS, 2019. *Agua. Datos y cifras*. [En línea]  
Available at: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

ONU- Banco Mundial, 2018. *Making every drop count. An agenda for water action*. [En línea]  
Available at: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW\\_Outcome.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW_Outcome.pdf)

ONU, 2016. *World could face water availability shortfall by 2030 if current trends continue, Secretary-General warns at meeting of high-level panel*. [En línea]  
Available at: <https://www.un.org/press/en/2016/sgsm18114.doc.htm>

Pijush, K., Cohen, I. & Dowling, D., 2011. *Fluid mechanics*. USA: Elsevier.

- PNUD, 2018. *Índices e indicadores de desarrollo humano*. Nueva York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- R., S. y otros, 2019. Development of digital elevation model for storm-water modeling for deltaic regions of thanjavur suburbs of southern india. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, pp. 193-201.
- Ramírez, W., 2006. *Consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el tratamiento de agua en Colombia*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Restrepo, J. & Aguilar, J., 2019. El derecho al agua como Derecho Fundamental. *Nuevo Derecho*, 15(24), pp. 5-16.
- Richmond, B., 2001. *An introduction to system thinking*. Hanover: High Performance Systems.
- Romero, M., Rodríguez, E., Ruvalcaba, G. & Bernal, C., 2012. *El principio de Bernoulli y efecto de tubo de Venturi*. [En línea] Available at: <https://delatorresteffani.files.wordpress.com/2014/04/principio-de-bernoulli-1.pdf>
- Rubio, M., Ruiz, S. & Gómez, F., 2019. Derechos humanos en España: protección del derecho al agua en familias con problemas de asequibilidad por riesgo de pobreza y exclusión social. Análisis crítico para una reforma legal. *Agua y territorio*, pp. 103-114.

- Russell, O., 2017. *Blockchain and Water: Everything You Need to Know*. [En línea]  
Available at: <https://hackernoon.com/blockchain-and-water-everything-you-need-to-know-b7e753108715>
- Ryder, G., 2018. *How ICTs can ensure the sustainable management of water and sanitation*.  
[En línea]  
Available at: <https://news.itu.int/icts-ensure-sustainablemanagement-water-sanitation/>
- Saad, H., 2016. *Water Quality Assessment Using Satellite Remote Sensing*. [En línea]  
Available at: [en https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016cosp...41E.801H/abstract](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016cosp...41E.801H/abstract)
- Saif, Y. & Almansoori, A., 2014. Design and operation of water desalination supply chain using mathematical modelling approach. *Desalination* 351, pp. 184-201.
- Sandvik, K., 2017. *African Drone Stories, Behemoth A Journal on Civilization*. [En línea]  
Available at: <https://ssrn.com/abstract=3060768>
- Sarmiento, J., 2018. Migración por cambio climático en Colombia: entre los refugiados medioambientales y los migrantes económicos. *Revista Jurídicas* 15.2.
- Sheffield, J. e. a., 2018. *Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions*. [En línea]  
Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2017WR022437>
- Stankovic, M., Hasanbeigi, A. & Neftenov, N., 2020. *Uso de tecnologías de la 4RI en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe*. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo.

- Teegavarapu, R. & Simonovic, S., 2014. Simulation of multiple hydropower reservoir operations using system dynamics approach. *Water Resources Management*, pp. 1937-1958.
- Tidwell, V., Zemlick, K. & Klise, G., 2013. *Nationwide water availability data for energy-water modeling*. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.
- Todini, E., 2011. Extending the global gradient algorithm to unsteady flow extended period simulations of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 13(2), pp. 167-180.
- Tortosa, M. & Torra, I., 2005. *¿Puede hervir y estar más frío? y "la presión como detective"*, Barcelona: Número extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias.
- U.S. Water Alliance, 2012. *Weatherizing Water*. [En línea] Available at: <http://www.uswateralliance.org/2012/11/19/weatherizing-water/>
- UNDP, 2019. *Five approaches to build functional united nations development programme early warning systems*. Belgrado: United Nations Development Programme.
- Vásquez, N., 2011. *Aplicación de la mecánica de fluidos a la ingeniería petrolera*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vélez, J., 2003. *Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecida*. Valencia, España: Universidad de Valencia.

Washington, A., 2018. *A Survey of Drone Use for Socially Relevant Problems: Lessons from Africa*. [En línea]

Available

at:

[https://www.researchgate.net/profile/Alicia\\_Washington/publication/330988826\\_A\\_Survey\\_of\\_Drone\\_Use\\_for\\_Socially\\_Relevant\\_Problems\\_Lesson\\_from\\_Africa/links/5c5f380d299bffd14cb7e75b/A-Survey-of-Drone-Use-for-Socially-Relevant-Problems-Lessons-from-Africa.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alicia_Washington/publication/330988826_A_Survey_of_Drone_Use_for_Socially_Relevant_Problems_Lesson_from_Africa/links/5c5f380d299bffd14cb7e75b/A-Survey-of-Drone-Use-for-Socially-Relevant-Problems-Lessons-from-Africa.pdf)

Wells, H., 2018. *How Melbourne, Australia Uses AI to Cut Water Treatment Costs*. [En línea]

Available at: <https://news.itu.int/melbourne-cut-down-water-costs-using-ai/>

Williams, D., 2018. *The power of drones for the water sector*. [En línea]

Available at: <https://wwtonline.co.uk/features/the-power-of-drones-for-the-water-sector>

World Future Energy Summit, 2019. *The Power of Data: How Artificial Intelligence is Transforming Water*. [En línea]

Available at: <https://www.worldfutureenergysummit.com/wfes-insights/all-cleantech-applications-3-ai-in-water#/>

Wuni, I. & Shen, G., 2019. Holistic review and conceptual framework for the drivers of offsite construction: a total interpretive structural modelling approach. *Buildings*, 9(5), pp. 117-132.

Wu, W., Gao, J. & Chang, K., 2012. 'Virtual reality simulation system for water supply and distribution network. *Int. J. Computer Applications in Technology*, 45(4), pp. 205-213.