

Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano*

Francisco Mafla Chamorro**✉

Paola Sofía Paz Enríquez***

David Ricardo Javier Realpe Cabrera****

Gloria Lucía Cárdenas Calvachi*****

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Mafla, F., Paz, P., Realpe, D., y Cárdenas, G. (2016). Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano. *Revista UNIMAR*, 34(2), 221-238.

Fecha de recepción: 14 de enero de 2016

Fecha de revisión: 08 de abril de 2016

Fecha de aprobación: 29 de agosto de 2016

RESUMEN

El artículo fue realizado a partir del proyecto de investigación denominado: *Evaluación de fuentes alternativas de agua para el abastecimiento de San Juan de Pasto en Colombia bajo escenarios de sequía*. Para su elaboración se realizó una revisión bibliográfica a nivel regional, nacional y mundial relacionada con el recurso hídrico, su distribución, uso, manejo e impacto de los fenómenos de variabilidad y cambio climático, con el fin de conocer las bondades y desaciertos de las soluciones que se ha planteado a nivel mundial, principalmente en el fenómeno de sequía, para poder contextualizar las herramientas de apoyo enfocadas a la planificación local.

La revisión realizada permitió concluir que en la actualidad, la oferta y demanda hídricas varían alrededor del mundo, razón por la cual, el manejo del recurso hídrico se encuentra ligado a las características específicas y a las diferentes condiciones (meteorológicas, geográficas, demográficas, etc.) de cada zona, imposibilitando que se pueda realizar una gestión igual a nivel global.

Palabras clave: recurso hídrico, planificación, abastecimiento de agua, sequía.

Strategies for water resource planning for supply of human consumption

ABSTRACT

The article was based on a research project entitled: *Evaluation of alternative sources of water for the supply of San Juan de Pasto in Colombia under drought scenarios*. A bibliographic review was carried out at the regional, national and global levels related to water resources, their distribution, use, management and impact of the phenomena of variability and climate change, in order to know the benefits and failures of the solutions which has been raised globally, mainly in the drought phenomenon, in order to be able to contextualize the support tools focused on local planning.

*Artículo de Revisión. Elaborado a partir de la investigación titulada: *Evaluación de fuentes alternativas de agua para el abastecimiento de San Juan de Pasto bajo escenarios de sequía, 2015 – 2016*.

**✉ Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos; Ingeniero Sanitario. Docente tiempo completo Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: fmafla@yahoo.com.ar / fmafla@umariana.edu.co

***Ingeniera Ambiental. Joven investigadora Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: sofipaz@hotmail.com / paopaz@umariana.edu.co

****Ingeniero Ambiental. Joven Investigador, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: david-realpe@hotmail.com / davrealpe@umariana.edu.co

*****Magíster en Ingeniería Ambiental; Especialista en Alta Gerencia; Especialista en Docencia Universitaria; Ingeniera Química. Decana Facultad de Ingeniería Universidad Mariana; Correo electrónico personal: glucardenas@gmail.com; correo electrónico institucional: glucardenas@umariana.edu.co

The review concluded that current water supply and demand varies around the world, which is why water resource management is linked to specific characteristics and different conditions (meteorological, geographic, demographic, etc.) of each zone, making it impossible to achieve equal management at a global level.

Key words: water resource, planning, water supply, drought.

Estratégias para o planeamento de recursos hídricos para o abastecimento de consumo humano

RESUMO

O artigo foi baseado em um projeto de pesquisa intitulado: *Avaliação de fontes alternativas de água para o abastecimento de San Juan de Pasto na Colômbia em cenários de seca*. Realizou-se uma revisão bibliográfica nos níveis regional, nacional e global, relacionada aos recursos hídricos, sua distribuição, uso, manejo e impacto dos fenômenos de variabilidade e mudança climática, para conhecer os benefícios e falhas das soluções levantadas globalmente, principalmente no fenômeno da seca, a fim de poder contextualizar as ferramentas de apoio focadas no planejamento local.

A revisão concluiu que a oferta e a demanda atuais de água variam em todo o mundo, razão pela qual a gestão dos recursos hídricos está ligada a características específicas e condições diferentes (meteorológicas, geográficas, demográficas, etc.) de cada zona, impossibilitando fazer uma mesma gestão a nível global.

Palavras-chave: Recursos hídricos, planejamento, abastecimento de água, seca.

I. Introducción

El recurso hídrico es de vital importancia para el ambiente, debido a que éste presta diferentes servicios ambientales; uno de los más importantes es el de abastecimiento, tanto para la dinámica natural como para el sustento de la vida. Sin embargo, el ser humano ha utilizado dicho recurso de manera insostenible, alterando el balance hídrico en los ecosistemas a nivel mundial y por ende, limitando la oferta de agua dulce en las fuentes. Sumado a esto en la actualidad existen otros factores que alteran la disponibilidad del agua como: la contaminación de las fuentes hídricas, el cambio y variabilidad climática (Niño y Niña), la sobreexplotación de recursos, la deforestación, etc., que han ido generando la formulación de estrategias de planificación de este valioso recurso, mediante el uso de diferentes herramientas que permiten contemplar, estudiar y diseñar planes de uso y manejo del agua. Entre las herramientas que se emplean se encuentran múltiples métodos y metodologías como modelos matemáticos (AQUATOOL, WEAP, SWMM, HEC, FAO, WEPP, SWAT, WaterGAP, MODFLOW, QUAL2K, etc.), métodos de análisis multicriterio o multiobjetivo, desarrollo de planes de gestión, etc.

El presente artículo pretende revisar el estado actual del recurso hídrico y su manejo en las diferentes regiones, enfocado principalmente a las soluciones ante la problemática de escasez a nivel global, los planes a futuro, los modelos que permiten evaluar soluciones alternativas y las acciones desarrolladas para alcanzar un aprovechamiento equilibrado del recurso y una mayor cobertura.

2. Método

Para la elaboración de este artículo de revisión, se realizó la recopilación de la información mediante la búsqueda automatizada en línea obteniendo documentos, artículos, libros, informes, tesis de grado y otros trabajos relacionados con el tema del recurso hídrico, enfatizando en el abastecimiento de agua en relación con la escasez y en las estrategias de su planificación en el ámbito mundial, nacional y regional. De cada fuente se extrajo la información más relevante que permite un análisis pertinente de la situación global de la temática de estudio.

3. El recurso hídrico

El agua, uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la vida, se ha visto vulnerado puesto

que la humanidad lo ha utilizado para diversos usos, excediendo la capacidad de suministro de agua sin contemplar las necesidades de las generaciones futuras. En la actualidad el ser humano es más consciente de las consecuencias que el mal uso de este recurso puede causar, además comprende que la distribución del agua no es homogénea en todas partes del mundo. Es por ello que, a nivel mundial se han establecido diferentes lineamientos y políticas sobre la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como los propuestos en los Principios de Dublín sobre GIRH, la Directiva Marco europea del Agua (DMA), ONU, PNUD, UNESCO, WWF, GWP, entre otros.

En los últimos años la cantidad de agua en muchos países, se ha visto disminuida debido a actividades humanas como la deforestación, la contaminación o el uso inadecuado del recurso. Dichas actividades, han generado la pérdida de grandes áreas productivas a nivel mundial. El desabastecimiento es uno de los problemas más importantes debido a que el crecimiento de la población global ha aumentado la demanda, lo cual es más notable en las épocas de sequía, fenómeno natural que se presenta por la ausencia o disminución de la precipitación en épocas normales de lluvias, reduciendo su disponibilidad para diferentes usos, entre ellos el abastecimiento, generando diferentes problemas y conflictos sociales (Esparza, María y Mora, 2013).

Adicionalmente, la contaminación ha llevado a miles de personas en el mundo a consumir agua en malas condiciones, generando enfermedades gastrointestinales y pérdida de vidas humanas (Kalonji y Erdelen, 2012). Actualmente, cerca de dos mil millones de personas son afectadas por la escasez de agua dulce, motivo por el cual uno de los objetivos del milenio está encaminado al manejo de los recursos, especialmente a reducir en un 50% el número de personas que no tienen suministro de agua potable (United Nations Environment Programme, 2006).

El objetivo propuesto por la ONU en el 2000 fue la continuación, lo cual tiene concordancia con lo acordado en 1972 en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio humano, donde el tema ambiental tomó gran importancia, estipulando la planificación de la utilización de los recursos

naturales en cada una de las regiones, razón por la cual cada país del mundo posee sus propias regulaciones y normativas ambientales, como es el caso de Estados Unidos, que cuenta con la EPA (Environmental Protection Agency), entidad que regula el cumplimiento de las leyes y normativas ambientales (EPA, 2015).

Sin embargo, también existen organizaciones internacionales que velan por la protección y conservación tanto de los recursos naturales como de la biodiversidad del planeta, brindando guías de gestión y manejo de los recursos. Una de las organizaciones de mayor importancia en el tema ambiental es la UNESCO, cuyas estrategias y actividades se encuentran basadas en los objetivos del milenio. Esta organización ha elaborado y puesto en marcha diferentes programas como el programa hidrológico internacional creado en 1994 (UNESCO, 1994). Otra organización que juega un papel importante en cuanto al manejo de los recursos naturales es la WWF (World Wildlife Fund, en español Fondo Mundial para la Naturaleza), creada en 1961, con el objetivo de detener la degradación del planeta (WWF, 2015b).

Estas dos organizaciones han jugado un papel importante en todo el mundo, puesto que han establecido lineamientos generales para el manejo del recurso hídrico. Entre los documentos elaborados por estas organizaciones se encuentra la guía para el manejo integral del recurso hídrico (UNESCO, 2009), donde se establecen unas pautas generales para el manejo de las cuencas, las cuales han sido tenidas en cuenta por los países alrededor del mundo, así mismo la WWF establece criterios para su manejo, mencionando entre sus temas principales un enfoque holístico, casos de estudio, lecciones para el manejo de grandes ríos, etc. (WWF, 2015a).

El manejo de cuencas hidrográficas tiene una metodología usada en todo el mundo, la cual ha sido adaptada y complementada con otras metodologías; cada país hace sus ajustes, debido a que cada uno cuenta con una problemática diferente a resolver.

En África a pesar de elaborar estrategias de manejo, las épocas de sequía dificultan la distribución de agua, y estudios muestran que aunque exista gestión del agua

no es suficiente para satisfacer su demanda, por lo que se busca reasignar su distribución para mitigar el problema de desabastecimiento (Lévite, Sally y Cour, 2003). A pesar de ello, África continúa realizando planes para el manejo en cuencas importantes como la del río Congo, que abastece a cinco países: Angola, Camerún, República Central Africana, República del Congo y República Democrática del Congo (Ladel, Nguinda y Pandi, 2008).

Así mismo en el continente Asiático se lleva a cabo la elaboración de diferentes planes de manejo de cuencas como el realizado en la cuenca del río Yangtze, que corre a lo largo de la República China, el cual tiene una longitud de aproximadamente 6.300 km y abastece a más de 400 millones de personas (Te Boekhorst et al., 2010). En India el manejo de cuencas también es similar, como el elaborado para la cuenca del río Yamuna (Ramakrishna, 2011).

En Oceanía, países como Australia tienen establecido el manejo de cuencas desde la parte gubernamental, manejado por el departamento de Ambiente (Australian Government: Department of Environment, 2004). Por otro lado, la WWF elaboró el manejo integral del río Sepik, uno de los ríos más importantes en el continente (WWF, 2008).

Por otra parte, Europa cuenta con la Directiva marco del agua, la cual orienta políticas del recurso hídrico para los estados miembros de la Unión Europea y existen lineamientos establecidos por el parlamento Europeo en relación a la actuación en la política de las aguas donde se da gran relevancia a la protección y conservación del recurso (European Community, 2000), además de resaltar la participación de la comunidad en los planes a establecerse. Uno de los planes de manejo de cuencas realizados dentro del continente es el enfocado al río Danubio, en el cual los 19 países involucrados colaboraron en el desarrollo del mismo, puesto que éste abastece a más de 80.5 millones de habitantes (ICPDR, 2009). Otro estudio utiliza un método de la huella hídrica proyectada al año 2050 en el cual se plantearon tres escenarios, el primero con la rutina normal de producción, comercio y consumo, el segundo con producción limitada y el tercero con comercio limitado, una vez realizado el estudio se tuvo como resultado que para los escenarios se incrementará la escasez en 18%,

6% y 1% respectivamente con respecto al año 2000 (Hafkemeijer, 2012). Razón por la cual, la gestión integral de cuencas en la Unión Europea ha tomado gran relevancia, ya que genera un conocimiento mayor del recurso hídrico, ecosistemas y usos, manejo de los recursos y gestión integral de calidad y cantidad de agua (Eleni y Panayotis, 2001). Con lo cual se pueden generar estrategias de gestión, que mitiguen el impacto de la escasez.

En el caso del continente americano los problemas son variados. En Estados Unidos se presenta un problema grave de escasez en estados como: California, Arizona, Colorado, Nevada y Nuevo México (Jiménez-Cisneros y Galizia-Tundisi, 2013). Es por eso que, el manejo de cuencas como la del río Colorado ha sido fundamental para la gestión del recurso con el fin de que ciudades, familias, negocios y granjeros tengan suficiente agua y a la vez, se asegure el bienestar del río (Environmental Defense Fund, 2015).

En Latinoamérica se ha optado por el desarrollo de planes de manejo de cuencas con el fin de integrar los sistemas: social, económico, político y ecológico. Para lograr dicho objetivo, en países como Colombia se han desarrollado documentos conocidos como Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS), estos planes no solo se enfocan en la cantidad del recurso hídrico, sino que también permiten establecer la ubicación de la población cercana a la fuente, zonas de captación, vertimiento, áreas de protección, etc. (Ospina et al., 2014).

Ahora bien, los países que cuentan con abundancia de este recurso como es el caso de algunos latinoamericanos, tienen el reto de determinar su futuro y su nivel de desarrollo (Nieto, 2011), además, cada uno de ellos posee diferentes condiciones climáticas, físicas, económicas, sociales, ambientales, legales e institucionales, lo que hace que un solo paradigma no sea aplicable o válido para todos los países (Mijares y Contreras, 2006). Por ejemplo en Bolivia, ciudades como la Paz y El Alto, ubicadas al occidente del país sufren problemas de abastecimiento hídrico debido a que éste depende de pequeñas cuencas glaciares de la Cordillera Real, y sumado a esto se teme por los impactos negativos que lleguen a ser causados por el cambio climático (Escobar, Lima, Purkey y Yates, 2014).

Un estudio realizado con el modelo WEAP en Bolivia, contempló un horizonte de tiempo entre los años 2010 y 2050, y mostró la desaparición total de los glaciares, lo cual puede llegar a afectar en especial la población de El Alto, llevando a contemplar una alternativa de almacenamiento de agua como medida de adaptación al cambio climático (Escobar et al., 2014), o asumir otras alternativas de abastecimiento, como las que se han adoptado en el Ecuador, donde se contemplan: acuíferos profundos, acuíferos superficiales, aguas manantiales, aguas lluvias y aguas superficiales (Rodríguez, 2011).

En México, poblaciones como Jalisco, sufren de escasez y no por falta del recurso sino por los existentes desperdicios de agua que superan el 50% en todas las actividades humanas. Lo cual lleva a afirmar que la única alternativa para el abastecimiento hídrico, es el uso eficiente de este recurso, tomando diferentes medidas como: reducir las fugas, aumentar las tarifas para evitar desperdicios, implementar una reglamentación sobre el uso eficiente del agua y realizar campañas de concienciación (Universidad de Guadalajara, 2009).

Así mismo en Colombia también se ha optado por la búsqueda de alternativas de abastecimiento, puesto que se conoce que el 4% de la población total sufre de un índice de escasez alto, el 7% medio alto y el 30% medio, y se estima que en el 2025 el porcentaje de la población afectada por la escasez en el país ascenderá al 39%, por lo cual se pretende un fortalecimiento de la gestión integral del recurso, especialmente en las estrategias de protección de oferta y de reducción de la demanda (Domínguez, Rivera, Vanegas y Moreno, 2008). Apoyado en investigaciones como la realizada en Cali, una de las ciudades más importantes en el país que ha sufrido problemas por desabastecimiento en algunos periodos de tiempo, y la cual según estudios técnicos, se podría contar con aproximadamente 35 fuentes alternativas de abastecimiento (Contraloría general de Santiago de Cali, 2012); esto demuestra que en muchos países de América Latina el problema de abastecimiento se presenta por falta de conocimiento, recursos económicos e inadecuado manejo, mas no por falta del recurso hídrico. Además, las mayores problemáticas en general se pueden asociar a las

presentadas en la microcuenca alta del río Pasto donde la sobreexplotación de recursos, deforestación, sobrepastoreo, monocultivos, labranza intensa y uso de abonos tanto químicos como orgánicos, deterioran la calidad de la fuente, disminuyen su caudal y alteran la biodiversidad del ecosistema, perjudicando a la población que se abastece de la cuenca (Jurado y Portillo, 2007).

Actualmente, en los planes de gestión se incluye el cambio climático debido a que ha generado aumento en la temperatura del mar, causando inundaciones y desastres, disminución de lluvias, erosión de suelos, incremento de la desertificación, entre otros. Todo esto afecta la producción alimentaria e incrementa a su vez, el índice de hambre a nivel mundial y, altera la calidad del agua por el aumento de la temperatura, aumento de sedimentos, nutrientes, carbono orgánico disuelto, agentes patógenos plaguicidas y sales, produciendo enfermedades y muertes por su consumo en todo el mundo (Nieto, 2011).

El consumo de agua en cada región es diferente, la dotación básica diaria está entre 20 y 40 litros y se aumenta en 50 litros cuando se tiene la necesidad de asearse y cocinar. Estados Unidos presenta un consumo muy alto de 500 litros por día, seguido por Reino Unido con 200 litros por día, en contraste con países africanos como Malí y Somalia que apenas llegan a 8,4 litros por día (Nieto, 2011).

América Latina, a pesar de tener abundantes recursos no ha sido ajena a presentar problemas de escasez, en estos países el mal manejo de los recursos es notable, y varias poblaciones ni siquiera tienen acceso al agua potable, todo esto debido al mal manejo del recurso por falta de políticas de gestión, tecnología insuficiente, conflictos y corrupción (Nieto, 2011). Sin embargo, en algunos países como en Colombia se ha comenzado a realizar estudios e investigaciones en relación al consumo de agua urbano, debido al rápido crecimiento demográfico y la disminución del abastecimiento, utilizando la herramienta Análisis de Flujo de Materiales (AFM), la cual permite el análisis de los flujos de entrada (caudal, precipitación), flujos intermedios (consumo, suministro y producción de agua), y los flujos de salida (vertimientos, escorrentía, pérdidas,

infiltración y evapotranspiración), con el fin de facilitar la implementación de un mejor manejo de aguas, asegurando la disponibilidad y calidad de agua (Serna, Isabel, Erazo y Urbano, 2014). Junto a investigaciones de este tipo se encuentran las enfocadas en el costo del recurso, ya que el valor económico puede generar un uso moderado de los recursos, como se evidenció en un estudio realizado en San Juan de Pasto, enfocado en valorar los costos económicos de calidad y cantidad del recurso hídrico, puesto que la población no hace uso razonable del recurso hídrico por la falta de cobro en los servicios de acueducto, por ello, el estudio se enfocó en lograr una sensibilización sobre el uso correcto del agua a través del costo (Enriquez, Bastidas, Duque y Miramag, 2009).

En otros países como en la India, se han realizado estudios de variación de los caudales ambientales a futuro, pese a que existen limitantes hidrológicos. El método permite estimar los caudales por medio de curvas de duración de flujo al igual que en Colombia, donde se usa el método del Q95 (IDEAM, 2004), que mediante la aplicación y validación de estos métodos, puede realizar otros estudios en distintas cuencas (Smakhtin y Anputhas, 2006).

Gran cantidad de investigaciones realizadas en países como Estados Unidos, Canadá, China, Inglaterra, Francia, Australia, Brasil y Alemania, se han enfocado en métodos para establecer el flujo de agua con base en el denominado Caudal Ecológico Ambiental, destacando a Estados Unidos que entre los años de 1995 hasta 2012, dominó la producción científica en investigaciones de caudales ecológicos (Tonkin, Jähnig y Haase, 2014). El caudal ecológico ambiental se define como la cantidad de agua que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema, preservando los valores ecológicos, hábitat natural y funciones ambientales (Castro y Carvajal, 2006).

En la mayoría de los planes de manejo del recurso hídrico se tiene en cuenta la cantidad de captación para abastecimiento, por lo tanto, para extraer agua de una fuente hídrica, se debe realizar un estudio del caudal ambiental, a fin de garantizar la cantidad de agua mínima que la fuente debe tener y la cantidad máxima que se puede extraer para abastecimiento, sin perjudicar las funciones del ecosistema, puesto que este caudal va relacionado con los procesos

físicos, químicos, geomorfológicos y biológicos que se presentan en el sistema (Parra y Carvajal, 2012).

Dentro de los planes de cuencas, es de vital importancia determinar las causas de contaminación en los cuerpos de agua; para esto, se realizan análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, además de un estudio de impacto ambiental para prevenir riesgos tanto ambientales como sanitarios. Una vez se tienen los resultados del análisis, se plantean alternativas de prevención de la contaminación como ordenamiento de cuencas, reducción de agroquímicos, reducción de actividades humanas que se encuentran sobre la distancia mínima al cuerpo de agua, se implementa un tratamiento de aguas antes del vertimiento y una ubicación adecuada de los residuos sólidos (Guerrero, 2007).

En los últimos años se han realizado estudios a nivel mundial del comportamiento de las descargas de agua dulce en los océanos, debido al crecimiento demográfico; se ha pensado que las actividades antrópicas han disminuido los caudales que conducen a los océanos, por tal razón se esperaba que los caudales se vieran alterados en el periodo de 1948-2004, no obstante, se evidenció que la influencia humana es muy pequeña, mientras que la precipitación es la base para que existan las variaciones interanuales de descarga, ya que este parámetro es alterado por los fenómenos Niño y Niña (Dai, Qian, Trenberth y Milliman, 2009).

El manejo del recurso hídrico, se torna complejo debido a que el agua continental es depositada en distintos cuerpos de agua, dependiendo del tipo de cuenca y es transportada por las corrientes hasta llegar al mar, lagos, lagunas, humedales y en algunas ocasiones, el agua se evapora o infiltra totalmente (Visión Mundial Canadá, 2004), lo que hace que la planificación no sea igual en todas las regiones. Sin embargo, la mayoría de las aguas continentales son descargadas en el océano, por lo tanto, el 90% de la contaminación que reciben los ríos es llevada al océano (Escobar, 2002).

3.1 Impacto de los fenómenos de variabilidad y cambio climático en el recurso hídrico

El cambio climático es un proceso natural donde el clima se modifica con respecto a datos históricos en

una escala regional o global. Los cambios se pueden evidenciar en los parámetros meteorológicos como la temperatura, presión atmosférica, precipitación, nubosidad, entre otros. Aunque en la actualidad este concepto suele usarse comúnmente para referirse por cambio climático al “cambio de clima ocasionado por la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992).

El calentamiento global se asocia a los constantes cambios de los componentes del ciclo hidrológico como cambios en la intensidad de precipitación, humedad del suelo, escorrentía, derretimiento de la nieve y el hielo, aumento de evaporación y vapor de agua en la atmósfera, entre otros (IPCC, 2008).

En estudios recientes a nivel mundial se ha comprobado mediante modelos matemáticos que el incremento de las temperaturas y la variabilidad en las precipitaciones, llevan a un aumento en la demanda de agua para riego (Alcamo et al., 2003). El incremento de la demanda de agua de uso doméstico e industrial debido al cambio climático puede que no tenga tanta relevancia, puesto que se estima que este aumente menos del 5% (IPCC, 2008); sin embargo, los impactos que tiene este fenómeno sobre los cuerpos de agua en las diferentes partes del mundo pueden ser fatales.

En China en los últimos 50 años se ha observado que aunque la precipitación anual varía dependiendo de la zona del país, hay alteraciones en los parámetros meteorológicos debido a que las temperaturas promedio aumentaron al igual que el nivel del mar; en el norte y noreste, la precipitación se redujo a diferencia del sur y noroeste, donde se incrementó significativamente, razón por la cual las sequías se tornan más frecuentes en el norte y noreste, así como las inundaciones más críticas en el río Yangtzé y el sureste de China (Tanner, Jun y Holman, 2008). Diferentes consecuencias del cambio climático se evidencian no solo en China; investigaciones en otros países del continente asiático como en India, presentan que algunas cuencas como la Kosasthaliyar estiman un incremento de la temperatura de 3° centígrados para el 2100, junto con una reducción del 10% en la precipitación (Mudgal, 2014).

Así como en Asia también en América Latina se ha evidenciado alteraciones de las condiciones meteorológicas principalmente en la precipitación y temperatura, agravado por cambios significativos en el uso del suelo. Se estima que para finales del siglo en América Latina, el calentamiento será de 1° a 4° centígrados para escenarios de emisiones B2 (población mundial crece continuamente menos que A2, se promueven las políticas ambientales, desarrollo económico medio y cambios tecnológicos (Universidad de Oviedo, 2001)) y de 2° a 6° centígrados para el escenario A2 (Aumento continuo y constante de la población, prima el desarrollo económico nacional, rápido y regionalizado con pocos cambios tecnológicos (Universidad de Oviedo, 2001)).

En el 2020 en América Latina la población afectada por el estrés hídrico será entre 7 y 11 millones de habitantes (Conde y Saldaña-Zorrilla, 2007), lo cual se ha venido observando más específicamente en planes o estudios de cada país.

En Chile se han impulsado investigaciones, adoptando herramientas de modelación, con el fin de conocer el estado actual y futuro de sus cuencas en relación al fenómeno de cambio climático, evaluando periodos de tiempo donde el caudal de oferta al igual que la precipitación disminuyen (Mena, 2009). Una de estas investigaciones fue realizada en la cuenca del río Tinguiririca, evaluando escenarios del cambio climático A2 y A1B (crecimiento económico y poblacional rápido en un mundo globalizado, tecnologías eficientes y uso balanceado de los recursos (Universidad de Oviedo, 2001)), encontrando que a pesar de que el escenario A2 (aumento continuo y constante de la población, prima el desarrollo económico nacional, rápido y regionalizado con pocos cambios tecnológicos (Universidad de Oviedo, 2001)) suele ser considerado el más agresivo para las condiciones atmosféricas, resultó que el escenario A1B es el que puede llegar a presentar consecuencias negativas aún más críticas para esta cuenca (Reyes, 2012), lo cual es un llamado a la investigación del cambio climático para cada una de las diferentes zonas.

En Colombia, estudios de índices de escasez arrojan resultados de importancia como el realizado en la cuenca del río Pamplonita, donde cuatro de los nueve municipios presentan un alto índice de

escasez (Posada, Domínguez y Rivera, 2005). Así como también en un estudio realizado en la cuenca del río Pasto en el departamento de Nariño, donde se encontró un índice de escasez alto en la parte alta de la cuenca (Corponariño, 2008). Por esta y otras razones, países como Colombia han optado por plantear lineamientos y estrategias para el cambio climático, las cuales han impulsado al país a ser el cuarto en Latinoamérica en proyectos MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio) registrados, y el onceavo en el mundo (Yepes, 2012).

Uno de los impactos esperables del cambio climático sobre diferentes zonas del mundo es la sequía, la cual se entiende como la disminución de la precipitación en un periodo de tiempo prolongado, sin embargo, se ha encontrado que esta no es su única definición, y que por el contrario, posee una clasificación clara dependiendo de la disciplina de donde se analice (Valiente, 2001).

En Europa se presentan zonas semiáridas en su parte sur, lo que amenaza no solo el abastecimiento hídrico sino también el abastecimiento alimenticio, además se estima que en la parte central y oriental del continente, la precipitación en época de verano disminuirá y se evidenciará una presión ambiental en cuanto al paisaje, degradación del suelo y forestal, riesgos naturales y el manejo del agua (IPCC, 2008), en la zona occidental del continente, para países como España, en el año 2030 se espera una disminución de aportaciones hídricas en escenarios de aumento en la temperatura media anual de 1°C y otro con disminución de un 5% en la precipitación media anual (Iglesias, Estrela y Gallart, 2007). Lo que es fundamental para la planificación futura del recurso hídrico, adoptando planes de manejo y adaptación al cambio climático, no solo en Europa sino a nivel mundial.

Norteamérica se encuentra en un contexto de sobreasignación de los recursos hídricos como resultado de la aceleración del cambio climático, aumentando la competencia entre los diferentes usos de este recurso (agrícola, industrial, ecológico, etc.), además se estima una disminución en la precipitación media anual, a diferencia de Canadá en donde se podrá incrementar en un 20% (IPCC, 2008).

En México se han realizado investigaciones de este tipo de impacto considerando su estado actual y

estimando el futuro, el cual puede presentar varios retos en cuanto al abastecimiento de la población, lo que lleva a considerar la desalinización como una solución alternativa al problema de escasez hídrica (Esparza et al., 2013).

Enfoques de planificación de recursos hídricos

A través del tiempo el ser humano ha sido protagonista del incremento en la demanda del recurso hídrico con el fin de suplir las necesidades internas, industriales y de agricultura, pasando por alto que la demanda de este recurso implica la alteración de la dinámica de los ecosistemas (Loucks y Van Beek, 2005).

Esta problemática obliga a que cada región tenga un conocimiento básico de las cuencas hidrológicas, que permita establecer lineamientos a seguir para su protección, considerando su uso y disponibilidad, tanto en la actualidad como en el futuro (Ordoñez, 2011). Dicho conocimiento se ha plasmado en diferentes manuales de manejo de los sistemas hídricos, documentos que pretenden ser una herramienta de toma de decisiones para los planificadores (Visión Mundial Canadá, 2004). Puede que a simple vista el manejo de una cuenca hidrográfica no sea tan importante como otras alternativas de solución, sin embargo, el manejo integral de una cuenca debe ser prioridad en la administración del gobierno, por los beneficios regionales y globales que puede generar para toda la sociedad (López, 2014).

El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) desde el año 2004 ha venido trabajando en el desarrollo de nuevos modelos para el manejo sostenible del agua, enfocando su análisis en el caudal ecológico, llegando a brindar una guía rápida para la determinación del mismo, herramienta que mediante la aproximación hidrológica, ilustra los procedimientos a seguir para la determinación del régimen del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (Salinas, 2011).

La planificación del recurso hídrico, cada vez, toma mayor importancia en los temas generales relacionados con el ambiente, debido a que, la humanidad no conforme con transgredir tres de las nueve fronteras (cambio climático, pérdida de biodiversidad y ciclo del nitrógeno), está vulnerando

la cuarta, que corresponde a la utilización del agua potable (Kalonji y Erdelen, 2012); lo cual ha llevado a países en desarrollo a tomar medidas y estrategias de planificación con el propósito de disminuir el consumo de agua potable, meta que fue alcanzada según la UNESCO (2014), cuyos reportes manifiestan una disminución de consumo de agua potable en estos países.

En países latinoamericanos como Chile, conscientes de que el 73% del agua es consumido por el sector agrícola, el 21% por la minería y otros usos industriales, se han formulado estrategias nacionales de los recursos hídricos, enfocados en cinco ejes principales entre los que se encuentra: gestión eficiente y sustentable, mejoramiento institucional, enfrentamiento de la escasez, equidad social y ciudadanía informada (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2012). Además de realizar diferentes investigaciones en búsqueda de alternativas de abastecimiento como la realizada en relación a la captación de agua de las nieblas costeras (Soto, 2000), en otros países de América Latina como Brasil, se han realizado estudios en relación a la calidad del agua de sus cuencas mediante modelos de elevación digital, donde se incluyen red de drenaje, contornos y punto de elevación con ayuda de un software (ArcMap versión 9.1), importante herramienta que apoya la gestión de los recursos hídricos (Ferreira, 2007).

Colombia no se ha quedado atrás en cuanto a estudios en relación al tema de la planificación del recurso hídrico, y por el contrario, ha venido realizando investigaciones enfocadas en los diferentes fenómenos y temas correspondientes al agua, como los fenómenos niño y niña y su influencia en la oferta hídrica de una cuenca hidrográfica (Ávila, Carvajal y Gutiérrez, 2014), además de planes y estrategias, vigiladas y exigidas por autoridades ambientales en el país dependiendo de la zona, por ejemplo, en la zona sur se cuenta con planes de manejo del recurso hídrico y estrategias de gestión de los principales cuerpos de agua y microcuencas, entre ellos, el corredor Andino Amazónico Páramo de Bordoncillo (Corponariño, Ministerio del Medio Ambiente y Corpoamazonía, 2002), la microcuenca Mijitayo (Madroñero, 2006), la microcuenca Las Minas (Corponariño, Secretaría

de Gestión Ambiental - Alcaldía de Pasto y Grupo de Estudios y Acciones Ambientales [GREDA], 2008), la quebrada Miraflores (Corponariño, 2009), el Humedal RAMSAR Laguna de la Cocha 2011 (Ministerio del Medio Ambiente y Corponariño, 2011). Y así como en el sur, el país cuenta con diferentes planes de manejo y ordenamiento para el resto de las regiones.

Herramientas de apoyo a la planificación

La planificación del recurso hídrico es la base para el aprovechamiento de cualquier fuente de agua, por lo tanto, la implementación de herramientas es fundamental en el desarrollo de la gestión de este recurso, puesto que permiten estudiar, caracterizar y contemplar las diferentes alternativas, tanto de uso como de manejo actual y futuro.

Una de las herramientas para la toma de decisiones y a la que muchas veces se le ha restado importancia, es el ordenamiento de cuencas hidrográficas, cuyo enfoque sistémico es un instrumento útil para la planificación de proyectos estratégicos en cada territorio (López, 2014), brindando de esta manera, información básica y fundamental para la toma de decisiones.

Entendiendo que, las decisiones que se toman son de vital importancia, la planificación del manejo del recurso debe contemplar la probabilidad de ocurrencia de los eventos relacionados con fenómenos de variabilidad climática como los fenómenos del Niño y Niña, debido a que estos tienen una influencia en el comportamiento de la oferta de las cuencas abastecedoras (Ávila et al., 2014), así como también se debe tener en cuenta escenarios que muestren el crecimiento demográfico, una reducción en demanda per cápita, y deben considerarse variables de incertidumbre.

Esta incertidumbre se basa principalmente en que al planificar el recurso hídrico se tiene en cuenta la demanda para el consumo humano, proyectándola en un periodo de tiempo determinado, sin contemplar que el ser humano cada día aumenta sus "necesidades", y al aumentarlas incrementa el consumo de los recursos que lo rodean, entre ellos el agua; se ha llegado a estimar que el costo para

satisfacer las necesidades futuras en infraestructura para el agua es de aproximadamente de 180 mil millones de dólares para el 2025, esta cifra fue calculada estimando que la demanda futura de agua alcanzará el nivel de los países industrializados, pero si el cálculo se centrara en la demanda solo para satisfacer las necesidades básicas del ser humano, se estima un costo en el rango de 10 a 20 mil millones de dólares (Gleick, 2003).

Además de contemplar diferentes circunstancias o condiciones propias de la cuenca hidrográfica, es necesario considerar la metodología con la que se desarrollará su estudio y manejo. Uno de los métodos para la elección de alternativas es el análisis multicriterio, el cual permite asignarle valor a diferentes parámetros y objetivos, que posteriormente son evaluados con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa mediante diferentes criterios, en el caso de las fuentes, se analiza la cantidad, calidad, distancia, acceso, etc. (Romero, 1996). Uno de los países que ha optado por el uso de esta metodología es Brasil, y para asegurar la veracidad de cada una de las metodologías, se realizó un estudio de la cuenca baja Cotia, donde se plantearon 20 criterios y 9 alternativas evaluados por cinco métodos diferentes, encontrando que cuatro de los cinco métodos arrojan los mismos resultados (Zuffo, 2002).

Otro país que está contemplando este tipo de herramienta para toma de decisiones es Colombia, donde se realizó un estudio del análisis multiobjetivo, enfocado en la gestión de la demanda de agua. En dicho estudio se plantearon distintas alternativas para su aprovechamiento, ahorro y uso. Mediante el uso del software SIAM, que consiste en la aplicación de los diferentes métodos de análisis multiobjetivo que permite calificar cada alternativa (Perpiñan, 2013) y facilita la selección de la mejor de ellas en el manejo del recurso.

En la actualidad los modelos matemáticos se han convertido en una herramienta importante para la toma de decisiones, puesto que estos pueden llegar a aproximar el comportamiento del fenómeno a estudiar, como es el caso de la sequía. La simulación a gran escala de este fenómeno puede ser muy cercana a la realidad aunque tiene limitantes en cuanto al comportamiento de las variables

meteorológicas, como se comprobó mediante la utilización del modelo WATCH (WaterMIP) en Europa, en el que tuvo en cuenta el número de sequías, duración, gravedad, atenuación, alargamiento y tipo de sequía. Los episodios de sequía se dieron cuando la precipitación pasaba del suelo a las aguas subterráneas, no obstante se presentaron en periodos de tiempo relativamente cortos debido a la rápida saturación del suelo (Van Loon, Van Huijgevoort y Van Lanen, 2012).

En Europa el uso de modelos matemáticos para la simulación de los diferentes escenarios climáticos esperables se ha visto impulsado en zonas como España en donde se ha llevado a cabo estudios con base en leyes regionales y el modelo Hadley center (UK), estimando un aumento en la temperatura de 2.5°C para el año de 2060 (Iglesias et al., 2007).

Otro de los modelos que permiten simular el comportamiento hidrológico en una cuenca con mayor aplicación a nivel mundial es el HEC-HMS, que tiene como finalidad predecir la escorrentía en una cuenca, teniendo en cuenta la cartografía y datos meteorológicos como la precipitación (Anderson, Chen, Kavvas y Feldman, 2002).

Estos estudios casi no han sido realizados en países en desarrollo, sin embargo en la última década países como la India, han optado por el uso de modelos matemáticos como el HEC-HMS y WEPP, con el fin de contrastar el funcionamiento de ambos, se analizó el comportamiento del caudal para años anteriores y futuros y se concluyó que el modelo HEC-HMS tiene mayor precisión en la simulación diaria de la escorrentía que el modelo WEPP (Verma, Jha y Mahana, 2010).

El modelo HEC-HMS, no solo ha sido utilizado y/o estudiado para comportamiento general de una cuenca, sino también ha sido empleado para estimar fenómenos específicos como las inundaciones con el fin de predecir su amplitud y duración, lo que es de gran relevancia puesto que la expansión demográfica ha reducido la infiltración del agua, debido a la impermeabilización de los suelos, provocando así las inundaciones. Un estudio de este tipo fue realizado en Texas donde se calibraron los datos para simular las inundaciones provocadas por una tormenta utilizando datos del satélite Landsat

TM. La calibración del modelo se realizó utilizando hidrogramas para estimar crecidas, coeficientes de infiltración, tiempo de concentración y flujo de base. El resultado de este trabajo permite contemplar los modelos matemáticos como una herramienta vital para el desarrollo de estudios hidrológicos a nivel regional (Knebl, Yang, Hutchison y Maidmen, 2005).

Una extensión del software HEC (Hydrologic Engineering Centers) es el modelo HEC-RAS, el cual es de gran utilidad para poder analizar el comportamiento hidráulico del flujo a superficie libre y la calidad del agua. En este modelo se introducen variables de caudales (máximo, mínimo, promedio), puntos de vertimiento, parámetros de calidad, entre otros, apoyados en escenarios proyectados a futuro que facilitan el estudio del comportamiento de adaptación de la cuenca con fines de uso y manejo adecuado del recurso hídrico (Luna y Santander, 2013).

Otros modelos como el WaterGAP 2, permiten calcular el uso y disponibilidad del agua en una cuenca, utilizado no solo para encontrar la escorrentía superficial sino también la recarga de aguas subterráneas. Además, tiene un método que permite llenar los vacíos por ausencia de datos relacionados con el recurso hídrico (Alcamo et al., 2003).

La planificación del recurso hídrico no solo abarca el comportamiento de sectores naturales y rurales sino también el comportamiento en sectores urbanos, razón por la cual modelos como el SWMM están programados para simular el comportamiento de lluvia y escorrentía en un evento continuo especialmente en zonas urbanas (Pathak y Chaudhari, 2015), a diferencia de otros que tienen mejor aplicación en flujos naturales (HEC-HMS/RAS). El modelo SWMM se utiliza con datos meteorológicos (lluvia neta y precipitación máxima) en un periodo de 24 horas, junto con análisis estadísticos que ayudan en la precisión del modelo. Tras este modelo se pueden plantear escenarios futuros que sean base para la planificación (Benavides y Jurado, 2009).

Uno de los modelos que une la simulación de agua superficial con la subterránea es el AQUATOOL, el que ha sido aplicado en estudios como el realizado en el departamento del Valle del Cauca, Colombia,

donde se plantearon distintos escenarios para encontrar satisfacer la demanda actual y futura, incorporando al sistema actual de agua superficial, un sistema de bombeo de agua subterránea (Gutiérrez, 2007).

Un modelo similar al AQUATOOL es el modelo WEAP, estudiado en países como Italia donde las frecuentes sequías en las últimas dos décadas han impulsado el análisis preliminar de estos dos modelos, con el fin de evaluar planes alternativos y políticas de operación del recurso hídrico (Sechi, 2013).

El modelo WEAP sirve como un instrumento útil a la hora de tomar decisiones, porque permite contemplar una amplia gama de problemas en cada escenario que se desee plantear, teniendo en cuenta: la variabilidad del clima, las condiciones de las cuencas a estudiar, las demandas previstas, las necesidades ecosistémicas, los objetivos operativos, etc. (Yates, Sieber, Purkey y Huber-Lee, 2005). Además, trabaja con una interfaz SIG que permite trazar la cuenca con su respectivo esquema, para así poder estimar el comportamiento de oferta y demanda en diferentes escenarios (Vicuña, Coello y Cisneros 2009).

Este tipo de modelo puede ser aplicado en proyectos relacionados con el recurso hídrico, teniendo en cuenta la oferta, demanda, impactos que alteren el curso del agua, condiciones meteorológicas, relieve, entre otros. La ventaja principal del modelo WEAP, es que facilita la generación de diferentes escenarios, permitiendo así al planificador, elegir la complejidad según la información con la que cuente (Villafañe y Rada, 2011). En un estudio realizado en Jordania se utilizó este modelo para simular tres escenarios alternos, con el fin de optimizar la oferta y ampliar la cobertura de la demanda de agua en la cuenca del Valle del Jordán, puesto que, por ser esta una zona industrializada presenta un alto consumo de agua y por ende, un alto índice de escasez. En el primer escenario se contempló el abastecimiento con únicamente agua dulce, en el segundo con agua mezclada (agua dulce y residual tratada) y el tercero con solo agua residual tratada. Con base en un valor económico para cada una de las tres alternativas, se encontró que la mejor opción para abastecimiento es la estimada en el primer escenario (Hussein y Weshah, 2009).

El modelo WEAP también ha sido empleado para el análisis en los recursos hídricos en relación al cambio climático. En países latinoamericanos como en Colombia, se han realizado estudios en cuencas de los ríos La Vieja (Figueroa y Escobar, 2015b), río Otún (Figueroa y Escobar, 2015a) y Alto Magdalena (Escobar et al., 2014); así como también se ha estudiado la relevancia y utilidad del procedo ADR y del sistema WEAP para formulación de planes de ordenamiento y planes de manejo de cuencas (Purkey y Mendoza, 2015).

Y no solo en Colombia se han realizado estudios con el modelo WEAP sino también en Chile, donde se planteó un escenario a futuro para predecir los caudales en los periodos 2036-2065 y 2071-2100, además de calcular el estrés hídrico presente y futuro. Para realizar dicho estudio, se utilizaron las temperaturas mensuales de 5 estaciones desde 1976 a 2007, demanda de agua, precipitación media anual, caudal promedio (simulado y observado) e información proyectada de escenarios climáticos para las regiones de Chile para el periodo 2071-2100, donde se tuvo como resultado una disminución en los caudales del 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100 respectivamente (Mena, 2009). Lo que hace que este tipo de modelos sean de gran utilidad para la formulación de estrategias de gestión del recurso hídrico frente al calentamiento global.

Una de las ventajas del uso del modelo WEAP, frente a otros modelos, es que permite manejar niveles de incertidumbre en cuanto a los datos necesarios, a diferencia de otro tipo de modelos, que demandan mayor cantidad de información como es el caso del modelo SWAT (Castro, 2014). Además, puede ser desarrollado en cualquier escala, desde pequeños cuerpos de agua hasta grandes cuencas; este software es de fácil acceso y permite al usuario utilizar mapas creados en ArcGis para los límites de la cuenca y su esquema (Centro de Cambio Global Universidad de Chile, 2009).

El software WEAP también puede ser aplicado junto con otro tipo de métodos y modelos como el método FAO para simular la precipitación escorrentía, encontrando la oferta (escorrentía) y la demanda. En Kenia fue utilizada esta metodología mencionada con el fin de estabilizar el flujo y mejorar la cobertura de la demanda entre un 60% y

100%, mediante la construcción de dos represas. A pesar de contemplar esta alternativa, en aguas abajo la cobertura de demanda disminuyó entre un 45% y 100% (Akivaga, 2010).

Existen otros modelos enfocadas a cuerpos de agua subterráneas en los que se encuentra: Modflow y AQUATOOL (Gutiérrez, 2007), siendo el segundo similar a WEAP, otros modelos para el escurrimiento urbano como el SWMM (Benavides y Jurado, 2009), modelos que caracterizan el flujo subterráneo como MODFLOW y modelos que permiten analizar la calidad del agua como es el caso de QUAL2k (Centro de Cambio Global Universidad de Chile, 2009) tienen una inter-fase con WEAP.

4. Discusión

El recurso hídrico se ha visto afectado a través de los años por distintos factores naturales (meteorológicos y fenómenos climáticos) y antrópicos (crecimiento poblacional, uso inadecuado de los recursos, deforestación etc.), lo cual ha ido disminuyendo su disponibilidad, calidad y distribución. Esta problemática ha generado conflictos sociales alrededor del mundo (Esparza et al., 2013, y se han aumentado las enfermedades y pérdidas de vidas por el consumo de agua contaminada (Kalonji y Erdelen, 2012).

Para mitigar los problemas relacionados con el recurso hídrico algunas organizaciones a nivel mundial como UNESCO, WWF y ONU, han desarrollado estrategias de manejo sostenible del recurso, adaptadas a las características de cada región puesto que no todas las cuencas tienen el mismo comportamiento. El manejo adecuado de cuencas favorece a las poblaciones aledañas con el suministro de agua, bienes y servicios ambientales que estas prestan.

Los países latinoamericanos tienen, debido a su topografía y al tener el mayor porcentaje de páramos en el mundo, las cuencas como grandes reservorios de agua almacenada en el suelo y el subsuelo; sin embargo, a pesar de tener abundancia del recurso no son manejadas adecuadamente, porque no se puede aplicar el mismo plan de gestión y manejo para todas las regiones debido a la complejidad que cada una presenta, por lo tanto, se deben adaptar a cada región como lo afirman varios autores (Nieto, 2011; Escobar et al., 2014).

Para tener un manejo óptimo de cuencas en Latinoamérica, se ha ido desarrollando diferentes planes que integran los sistemas político, social, ecológico y económico, con el propósito de asegurar la cantidad de agua para las generaciones futuras, sin afectar los ecosistemas (Ospina et al., 2014). Este manejo es completamente diferente al de países de otras regiones, donde aunque tengan adecuadas estrategias de manejo no cuentan con el recurso, esto se ve reflejado en el continente Africano cuya problemática se basa en que el recurso no puede ser distribuido constantemente debido a los largos periodos de sequía y la falta de políticas e infraestructura.

La disponibilidad de recurso, infraestructuras, planes, de gestión y estrategias enfocadas a la distribución para consumo humano, influye en la cantidad de agua de diferentes países; mientras que en los países africanos la población sobrevive con menos de 10 litros de agua al día, otros como Estados Unidos consumen cerca de 500 litros. En Colombia la dotación va desde los 100 hasta los 150 litros por habitante al día (Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia, 2000). Una dotación adecuada de agua involucra muchos factores y debe acoplarse a las necesidades de cada país, teniendo en cuenta las necesidades básicas de cada región. Así mismo, se deben aplicar restricciones para quienes no aprovechen moderadamente el recurso, y así optimizarlo para mantener la oferta de las cuencas y asegurar la dotación equitativa a la población actual y futura.

Uno de los problemas que presentan varias cuencas al abastecer a una población es el no contar con un adecuado estudio del caudal ecológico o en algunos casos es ignorado, este caudal permite a la cuenca mantener la cantidad mínima de agua para realizar los procesos físicos, químicos, biológicos y morfológicos cuando se extrae agua para abastecimiento tal como lo mencionan los autores Parra y Carvajal (2012).

Los planes de manejo de cuencas han sido desarrollados en diferentes países tanto en cuencas dentro de un país como en multifronterizas y, su aplicación ha permitido tener un mejor manejo del agua. Los mejores resultados se han dado cuando se han incluido variables afectadas por el cambio climático.

El cambio climático está asociado con los cambios en los parámetros meteorológicos que ocasionan mayor evaporación, lluvias más intensas, deshielo, inundaciones, sequías prolongadas, etc. En el caso del aumento de temperatura ha generado reducción de agua en las fuentes abastecedoras, por lo tanto, este ha sido un factor para que el índice de escasez esté incrementando. Las soluciones se han enfocado en la realización de prácticas que generen menos impactos negativos en relación al cambio climático, por ejemplo, la reducción de los gases de efecto invernadero aplicando mecanismos de desarrollo limpio (Yepes, 2012).

Cuando las fuentes de agua no tienen la suficiente oferta, se ha optado por buscar alternativas que permitan satisfacer la demanda sin alterar los procesos internos de cada una de las cuencas, entre estas alternativas se cuentan la desalinización (Esparza et al., 2013), la captación de agua de las nieblas costeras, agua lluvia (Soto, 2000), agua subterránea (Gutiérrez, 2007) y aguas superficiales (Rodríguez, 2011).

Los modelos matemáticos de recurso hídrico se han convertido en una herramienta útil en el estudio, el escalamiento de estrategias, la afectación de diferentes variables, el pronóstico de comportamientos a lo largo del tiempo, las demandas futuras, las problemáticas más relevantes, y todos aquellos aspectos que puedan incidir sobre la planificación adecuada de la cuenca.

El éxito en la utilización de los modelos que la información ingresada sea de calidad y suficiente para que se logre obtener un comportamiento similar al real de las cuencas (Anderson et al., 2002) además de predecir fenómenos naturales de manera adecuada (Knebl et al., 2005).

Hoy en día se ha llegado a contar con modelos como el WaterGAP y WEAP capaces de completar datos faltantes mediante distintos métodos como: interpolar, reemplazar, repetir o interpolar con el método de año agua, en aquellos casos donde la información hidrometeorológica se encuentra incompleta (Alcamo et al., 2003).

En el momento en que se esté buscando alternativas de agua para abastecimiento, cuando se haya realizado un plan de manejo de cuencas y los

estudios de cada uno de los cuerpos de agua, se tendrán opciones de las fuentes como alternativas, de las cuales se pueden seleccionar las mejores opciones mediante un análisis multicriterio, en el cual se tiene en cuenta distintos aspectos que son evaluados con valores numéricos, dándole un ponderado mayor a las mejores opciones para así tomar una decisión correcta.

5. Conclusiones

La planificación del recurso hídrico es un tema complejo debido a que la distribución y las condiciones en las que se encuentra este recurso, varían en todas las regiones del mundo, necesiéndose de un manejo diferenciado dependiendo de características específicas, imposibilitando un modelo de planificación que se pueda aplicar de manera general.

Para el desarrollo de la planificación y manejo del recurso hídrico es de vital importancia tener en cuenta fenómenos de variabilidad y cambio climáticos y la determinación de caudales ecológicos cuando se requiera realizar extracción de agua, esto permitirá que se adopten estrategias que tengan en cuenta condiciones propias y las dinámicas de los sistemas: sociocultural, económico y cultural de cada zona.

El uso de herramientas es de gran utilidad en la planificación del recurso hídrico, debido a que apoyan y facilitan la toma de decisiones, puesto que son múltiples y pueden ser usadas en casos específicos en cada región. Entre los instrumentos más utilizados en la actualidad están los modelos matemáticos, sin embargo, el uso de cada una de las herramientas complementa la formulación de otra, y de igual forma, los resultados de un modelo complementan las estrategias planteadas en un plan de manejo del recurso hídrico.

6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses sobre el trabajo presentado.

Referencias

Akivaga, M. (2010). *Simulation and scenario analysis of water resources management in perkerra catchment using weap model*. School of Engineering of Moi University.

Recuperado de http://www.weap21.org/Downloads/Final_Thesis_Eric%20Akivaga.pdf

Alcama, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T. & Siebert, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences*, 48, 317–337. doi:10.1623/hysj.48.3.317.45290

Anderson, M., Chen, Z., Kavvas, M. & Feldman, A. (2002). Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 312–318. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(312)

Australian Government: Department of Environment. (2004). Integrated Water Resource Management in Australia: Case studies - Contents. Retrieved from <http://www.environment.gov.au/resource/integrated-water-resource-management-australia-case-studies-contents>

Ávila, Á., Carvajal, Y. y Gutierrez, S. (2014). Análisis de la influencia del El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120–133.

Benavides, A. y Jurado, O. (2009). *Evaluación sistema de drenaje urbano mediante el uso de una herramienta de modelación matemática SWMM en la microcuenca Figueroa del municipio de Pasto*. Universidad Mariana.

Castro, L. y Carvajal, Y. (2006). Enfoques Teóricos para definir el Caudal Ambiental. *Ingeniería Y Universidad*, 10(2), 179-195.

Castro, N. (2014). *Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta del recurso hídrico en la vereda La Bella*. (Trabajo de Grado), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

Centro de Cambio Global Universidad de Chile. (2009). *Guía metodológica: Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Environment. Santiago, Boston.

Conde, C. y Saldaña-Zorrilla, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe : Impactos , vulnerabilidad y adaptación Edición especial cambio climático. *Revista Ambiente Y Desarrollo*, 23, 23–30.

Contraloría general de Santiago de Cali. (2012). *Informe resultado de aplicación de los estudios técnicos realizados por EMCALI EICE ESP en busca de alternativas para garantizar el suministro continuo de agua potable*. Cali, Colombia.

- Corponariño. (2008). *Índice de escasez de agua superficial: Cuenca del Río Pasto*. San Juan de Pasto, Colombia.
- _____. (2009). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico quebrada miraflores* (pp. 98–108). San Juan de Pasto, Colombia.
- Corponariño, Ministerio del Medio Ambiente y Corpoamazonía. (2002). *Plan de manejo del corredor Andino Amazónico páramo del Bordoncillo - Cerro de Patascoy, La Cocha, como ecorregión estratégica*. San Juan de Pasto, Colombia.
- Corponariño, Secretaría de Gestión Ambiental - Alcaldía de Pasto y Grupo de Estudios y Acciones Ambientales GREDA. (2008). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la microcuenca Las Minas, cuenca alta del Río Pasto, municipio de Pasto*. San Juan de Pasto, Colombia.
- Dai, A., Qian, T., Trenberth, K. & Milliman, J. (2009). Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, 22, 2773–2792. doi:10.1175/2008JCLI2592.1
- Domínguez, E., Rivera, H., Vanegas, R. y Moreno, P. (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 32(42), 195–212.
- Te Boekhorst, D., Smits, T., Yu, X., Li, L., Lei, G. & Zhang, C. (2010). Implementing Integrated River Basin Management in China. *Ecology & Society*, 15(2), 23. Retrieved from <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss2/art23/>
- Eleni, S. & Panayotis, C. (2001). *Decision making procedures in the sustainable development of River Basins*. Recuperado de http://www.hydrocrites.upatras.gr/UserFiles/Publications/Bekri_Yannopoulos%20ESME%202009.pdf
- Enriquez, A., Bastidas, C., Duque, L. y Miramag, R. (2009). *Valoración económica del recurso hídrico de la microcuenca Dolores del municipio de Pasto*. Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- Environmental Defense Fund. (2015). Colorado river setting the course. Retrieved from <http://www.coloradoriverbasin.org/about-us/>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2015). Laws & Regulations. Retrieved from <http://www2.epa.gov/laws-regulations/policy-guidance>
- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D. y Yates, D. (2014). Modelación hidrológica y escenarios de cambio climático en cuencas de suministro de agua de las ciudades de La Paz y El Alto. *Aqua-LAC*, 5, 2-4.
- Esparza, M., María, J. & Mora, L. (2013). Drought and Water Shortages in Mexico. Current Status and Future Prospects. *La Sequía Y La Escasez de Agua En México. Situación Actual Y Perspectivas Futuras*, 89, 195-219.
- European Community. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Parliament*, L327, 1–82. doi:10.1039/ap9842100196
- Ferreira, D. (2007). *Qualidade Dos Recursos Hídricos Hidrográficas Da Região Alto Rio Grande - MG*. Universidade Federal de Lavras.
- Figueroa, C. y Escobar, M. (2015a). Forjando capacidad de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Otún. *SEI*, 1–2.
- _____. (2015b). Modelación del recurso hídrico en la cuenca del río La Vieja en Colombia. *SEI*, 1–4.
- Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF). (2008). WWF Global. Retrieved from http://wwf.panda.org/what_we_do/where_we_work/new_guinea_forests/conservation_new_guinea_forests/wwf_projects_new_guinea/index.cfm?uProjectID=PG0036
- _____. (2015a). Integrated River Basin Management (IRBM). Retrieved from http://wwf.panda.org/about_our_earth/about_freshwater/rivers/irbm/lessons/
- _____. (2015b). WWF Global. Retrieved from http://wwf.panda.org/who_we_are/history/
- Gleick, P. (2003). Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. *Science (New York, N.Y.)*, 302, 1524–1528. doi:10.1126/science.1089967
- Guerrero, N. (2007). *Determinación de las causas de contaminación en las fuentes hídricas superficiales de la microcuenca alta-alta del río Pasto*. Universidad Mariana.
- Gutiérrez, M. (2007). Implementación del sistema soporte a la decisión Aquatool en la zona centro del departamento del Valle del Cauca-. *Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España Y Portugal*, 6, 39–46.

- Hafkemeijer, B. (2012). *WATERSCHAARSTE IN EUROPA: Het Effect van Verwachte Waterschaarste op Internationale Virtuele Waterstromen en Nationale Water Footprints*. Universiteit Twente.
- Hussein, I. & Weshah, R. (2009). Optimizing the Water Allocation System At Jordan Valley Through Adopting Water Evaluation and Planning System Model (Weap) I . Water in Jordan. In: *Thirteenth International Water Technology Conference* (pp. 753–777). Hurgada, Egypt.
- ICPDR. (2009). Danube River Basin District Management Plan. *Imprint*, (December).
- Iglesias, A., Estrela, T. y Gallart, F. (2007). Impactos sobre los recursos hídricos. *Impactos Del Cambio Climático En España*, 354.
- IPCC. (2008). *Climate change and water: IPCC Technical Paper VI*. In: J. Bates, B. Kundzewicz, Z. Wu, S. Palutikof (Ed.). *Climate change and water* (Vol. 403, p. 210). doi:10.1016/j.jmb.2010.08.039
- Jiménez-Cisneros, B. & Galizia-Tundisi, J. (2013). *Diagnosis of Water in the Americas*. México DF.: Mexican Academy of Sciences.
- Jurado, G. y Portillo, V. (2007). *Evaluación del efecto ambiental generado por el manejo inadecuado del suelo de la microcuenca alta-alta del río Pasto*. Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- Kalonji, G. & Erdelen, W. (2012). El agua tiene su punto de no retorno. *Un Mundo de Ciencia*, 10, 23.
- Knebl, M., Yang, Z., Hutchison, K. & Maidment, D. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75, 325–336. doi:10.1016/j.jenvman.2004.11.024
- Ladel, J., Nguinda, P. & Pandi, A. (2008). Integrated Water Resources Management in the Congo basin based on the development of Earth Observation monitoring systems in the framework of the AMESD Programme in Central Africa. *13th World Water ...*, 1–20. Retrieved from http://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs130_article.pdf
- Lévite, H., Sally, H. & Cour, J. (2003). Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: Application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 779–786. doi:10.1016/j.pce.2003.08.025
- López, W. (2014). Análisis Del Manejo De Cuencas Como Herramienta Para El Aprovechamiento Sustentable De Recursos Naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIII, 39–45. doi:10.5154/r.rchsa.2012.06.017
- Loucks, D. & Van Beek, E. (2005). *Water resources systems planning and management: An introduction to Methods, Models and Applications* (SR Nova P, p. 690). Turin, Italy: United Nations. Educational, Scientific and Cultural organization.
- Luna, S. & Santander, A. (2013). *Gestión del recurso hídrico a través de la simulación de la calidad de agua en el río el encano, humedal RAMSAR La Cocha*. Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- Madroñero, S. (2006). *Manejo del recurso hídrico y estrategias para su gestión integral en la microcuenca Mijitayo, Pasto Colombia*. Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñaza Tropical Agricultural Research and Higher Education Center.
- Mena, D. (2009). *Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca Andina del Río Teno, usando el modelo WEAP*. Tesis.Uchile.Cl. Universidad de Chile. Retrieved from http://www.thesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/celis_c/sources/celis_c.pdf
- Mijares, J. y Contreras, J. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. Montevideo: Programa Hidrológico Internacional (PHI) y UNESCO.
- Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia. (2000). *Sistemas de Acueducto, Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Basico Ras -2000*. Bogotá. Recuperado de http://cra.gov.co/apc-aa-fil/es/37383832666265633962316339623934/4._Sistemas_de_acueducto.pdf
- Ministerio de Obras Publicas de Chile. (2012). *Chile Cuida su Agua: Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025*. Recuperado de http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente y Corponariño. (2011). *Plan de manejo integral Humedal Ramsar Laguna de la Cocha*. Nariño, Colombia.
- Mudgal, B. (2014). Climate Variability and its impacts on runoff in the Kosasthaliyar sub-basin , India. *EARTH SCIENCES RESEARCH*, 18(1), 45–49.

- Naciones Unidas. (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el ...* Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y Cultura*, 36, 157–176.
- Ordoñez, J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica?*. Lima, Perú.
- Ospina, E, Francy, L., Cuervo, N., Cristina, M., Acosta, B., Jazmín, N., ... Charry, D. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS*. Colombia.
- Parra, E. y Carvajal, L. (2012). XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. In: *Modelamiento y Manejo de las Interacciones entre la Hidrología, la Ecología y la Economía en una Cuenca Ambientales* (p. 15). Medellín, Colombia.
- Pathak, H. & Chaudhari, P. (2015). Simulation of Best Management Practices using SWMM. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 02(01), 129–132.
- Perpiñan, A. (2013). *Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector Institucional*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Posada, C., Domínguez, E. y Rivera, H. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingeniería*, 22, 103-111.
- Purkey, D. y Mendoza, T. (2015). Relevancia y utilidad del proceso ADR y del sistema WEAP para la formulación de Planes de ordenamiento y Planes de manejo de cuencas y ríos en Colombia (POMCAs y PORHs). *SEI*, 1–4. Retrieved from <http://sei-us.org/publications/id/535>
- Ramakrishna, N. (2011). *Institutional Intervention in River Water Management: The Study of Yamuna River Sub-Basin in India*. Pune, Maharashtra.
- Reyes, C. (2012). *Proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones, bajo escenarios A1B y A2 de Cambio Climático*. Universidad de Chile, Chile.
- Rodríguez, G. (2011). *Abastecimiento de agua potable en Quito ¿Cuáles son las alternativas en gestión de crisis?* Instituto de Altos Estudios Nacionales.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. (4th ed.). Madrid, España: Gráficas Algorán.
- Salinas, S. (2011). *Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos*. México.
- Sechi, G. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *ELSEVIER*, 40, 214–225.
- Serna, G., Isabel, M., Erazo, G. & Urbano, M. (2014). Análisis de flujos de agua en áreas metropolitanas desde la perspectiva del metabolismo urbano. *Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal, Luna Azul*(39), 234–249.
- Smakhtin, V. & Anputhas, M. (2006). *An Assessment of Environmental Flow Requirements of Indian River Basins*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Soto, G. (2000). Captación de agua de las nieblas costeras (Camanchaca), Chile. *Manual de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia*, 131–162. Recuperado de <http://ftp.fao.org/docrep./FAO/010/ai128s/ai128s07.pdf>
- Tanner, T., Jun, X. & Holman, I. (2008). *Screening for Climate Change Adaptation in China : A process to assess and manage the potential impact of climate change on development projects and programmes in China* (p. 20). United Kingdom.
- Tonkin, J., Jähnig, S. & Haase, P. (2014). The Rise of Riverine Flow-ecology and Environmental Flow Research. *Environmental Processes*, 1, 323–330. doi:10.1007/s40710-014-0024-8
- UNESCO. (1994). *Programa hidrológico internacional*. Retrieved from <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/water-chairs/>
- _____. (2009). Water in a Changing World. *World Water*, 11(4), 1027-1045. doi:10.3390/w3020618
- United Nations Environment Programme. (2006). Freshwater Shortage. En: *Challenges To International Waters: Regional Assessments in a Global Perspective* (pp. 20–34). Nairobi, Kenia: Programa de las Naciones Unidas PNUMA.
- Universidad de Guadalajara. (2009). Soluciones Alternativas al Abasto de Agua Potable en la Región Costa Sur del Estado de Jalisco, México. In: *San Cristóbal, Venezuela 7th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (pp. 1–8). San Cristobal, Venezuela.

- Universidad de Oviedo. (2001). Infraestructura de datos espaciales del departamento de biología de organismos y sistemas. Retrieved from <http://idebos.bio.uniovi.es/GeoPortal/Atlas/Escenarios.html>
- Valiente, Ó. (2001). Sequía : Definiciones , Tipologías Y Métodos De Cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80.
- Van Loon, A., Van Huijgevoort, M. & Van Lanen, H. (2012). Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 4057–4078. doi:10.5194/hess-16-4057-2012
- Verma, A., Jha, M. & Mahana, R. (2010). Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy Water Environ*, 8, 131–144.
- Vicuña, S., Coello, C. & Cisneros, F. (2009). *Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos de la cuenca del Río Paute* (pp. 1–14).
- Villafañe, A. & Rada, O. (2011). Aplicación del modelo de planificación hídrica de cuencas WEAP al proyecto: Aducción de recursos hídricos Murata. *Técnicas de Investigación Documental, La Paz*, 6(6), 13.
- Visión Mundial Canadá. (2004). *Manual de manejo de cuencas*. World Vision. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Manual+de+manejo+de+cuencas#9>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 – A Demand, Priority, and Preference-Driven Water Planning Model Part 1: Model Characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500. doi:0250-8060
- Yepes, A. (2012). Cambio Climático: estrategias de gestión con el tiempo en contra ... *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos*, 16(1), 77-92.
- Zuffo, A. (2002). Seleção E Aplicação De Métodos Multicriteriais Ao Planejamento Ambiental De Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7, 81–102.