

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS DE AGUA DULCE

Juan C. Sánchez Martínez

Recibido: 2/12/2014

Aceptado: 5/03/2015

Resumen

El Cambio Climático es una realidad, y adoptar medidas de prevención en la planificación de la gestión de los recursos hídricos es más que nunca necesario. Existen evidencias incuestionables acerca de la tendencia mundial hacia una alteración de los patrones naturales del clima, que está y seguirá ocasionando un profundo efecto en los cuerpos naturales de agua, que a su vez va a incidir en la disponibilidad de agua, la demanda, y asignación de recursos hídricos a escala mundial, regional, de cuenca, y a nivel local. Ello puede poner en riesgo de perturbaciones episódicas del servicio de agua a numerosas regiones, que progresivamente irá escalando hasta condiciones de escasez crónica y de inseguridad, debido a la influencia que la carencia de agua tiene en forma directa sobre la economía, la pobreza, la salud pública y la viabilidad de los ecosistemas. En el presente trabajo se abordan los riesgos que el cambio climático representa para la calidad de los recursos de agua dulce, lo cual va a conducir a la necesidad imperiosa de hacer un uso más eficiente del agua, y a la vez de combatir el cambio climático mediante la adopción de medidas de mitigación y adaptación.

Palabras clave: Cambio climático, recursos hídricos, agua dulce, riesgo-patrón-agua.

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE QUALITY OF FRESHWATER RESOURCES

Abstract

Climate change is a reality, and to take preventive measures in planning the management of water resources is more than ever necessary. There is unquestionable evidence about the global trend towards an alteration of natural weather patterns that will continue causing a profound effect on the natural water bodies, which at the same time will affect water availability, the water demand and the allocation of water resources at global, regional, local and basin levels. This may cause episodic disturbances of water service to many regions that will gradually increase to conditions of chronic shortages and insecurity due to the influence that the lack of water has directly on the economy, poverty, public health and the viability of ecosystems. In this paper the risks that climate change poses to the quality of freshwater resources are addressed, which will lead to the urgent need to make more efficient the use of water and also to combat climate change through mitigating and adapting measures.

Keywords: climate change, water resources, freshwater, water risk.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA QUALITÉ DES RESSOURCES EN EAU DOUCE

Résumé

Le changement climatique est une réalité et adopter des mesures de prévention dans la planification de la gestion des ressources en eau est plus que jamais nécessaire. Il y a des preuves irréfutables sur la tendance mondiale vers une altération des modèles météorologiques naturels, qui est et continuera à provoquer un effet profond sur les plans d'eau naturels, qui, à son tour, aura un impact sur la disponibilité de l'eau, demande et allocation des ressources en eau au niveau mondial, régional, bassin et local. Ceci peut mettre en péril de perturbation épisodique du service de l'eau à de nombreux domaines, qui amplifiera progressivement les conditions des pénuries chroniques et l'insécurité, en raison de l'influence que le manque de l'eau a directement sur l'économie, la pauvreté, la santé publique et la viabilité des écosystèmes. Cet article se penche sur les risques posés par le changement climatique à la qualité des ressources en eau douce, qui conduira à l'impérieux besoin de faire une utilisation plus efficace de l'eau et en même temps de combattre le changement climatique par le biais de l'adoption de mesures d'atténuation et d'adaptation.

Mots clés: changement climatique, ressources en eau, eau douce, risque-modèle -eau

Introducción

Las aguas superficiales y subterráneas, los glaciares y las superficies nevadas son los recursos disponibles de agua dulce que posee el planeta. Estos recursos forman parte del llamado ciclo hidrológico, que es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera. Durante esta circulación ocurren reacciones químicas y el agua puede cambiar de estado cuando se traslada de un compartimiento a otro. Así, ríos, nubes, nieve, lluvia, etc., están en constante cambio: el agua de la superficie se evapora, el agua de las nubes precipita, la lluvia se infiltra en el subsuelo, etc., y estas transformaciones están estrechamente vinculadas con la variación natural del clima planetario. Por tanto, al producirse el cambio climático, que es la alteración de la variación natural del clima, ocurren modificaciones del ciclo hidrológico que afectan directamente a los recursos hídricos.

Los impactos que se van a derivar de esta alteración del ciclo hidrológico serán muy significativos, pues van a afectar a los recursos hídricos, que son tan esenciales para la humanidad, en numerosas regiones del planeta. Los impactos que se estima estarían ocurriendo en las próximas décadas si no se adoptan medidas para frenar el cambio climático son: la aceleración de la fusión del hielo de los glaciares, la alteración de los regímenes de lluvias, así como de los patrones de escorrentía superficial del agua y de la recarga de acuíferos, inundaciones extremas, fuertes sequías, alteración de la calidad de las aguas, e intrusión salina en los acuíferos costeros por la elevación del nivel del mar.

Los estudios realizados hasta ahora acerca de estos impactos se han enfocado más en los aspectos cuantitativos de la hidrosfera que en la afectación de la calidad de las aguas naturales que son la fuente del agua potable, y por tanto se dispone de menos información acerca de esto último. No obstante, el Panel de Expertos en Cambio Climático de Naciones Unidas ha sido categórico al afirmar en su 4to. informe de evaluación del clima (2007) que los registros disponibles y las proyecciones del clima futuro ponen en evidencia que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden verse significativamente afectados por el cambio climático, lo cual tendrá consecuencias adversas tanto sociales como para los ecosistemas.

Estas consecuencias vendrían a sumarse y a agravar otros factores distintos que ya están produciéndose, como lo son el incremento de la demanda y la reducción de la

disponibilidad (en cantidad y calidad) de agua, debido tanto al crecimiento demográfico como a las descargas de contaminación por la intensificación del uso de la tierra y de determinadas prácticas agrícolas e industriales. Ello a su vez incidiría, como en una cascada de impactos, sobre la salud humana, la seguridad alimenticia, el desarrollo rural y la economía de los países altamente dependientes de su producción agrícola, entre otros aspectos. De allí la importancia que reviste el conocer lo mejor posible cuáles van a ser los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos.

La relación entre el clima y el ciclo hidrológico

El clima es el sistema complejo conformado por la atmósfera, la litósfera, la criósfera (superficies cubiertas de hielo o nieve), la hidrósfera y la biósfera, y sus interacciones. Es un sistema que evoluciona con el tiempo bajo la influencia de sus propias dinámicas internas, pero también por efecto de los cambios que se producen en factores externos llamados forzamientos, que incluyen tanto fenómenos naturales como las erupciones volcánicas y las variaciones de la radiación solar, como cambios ocasionados por actividades humanas que alteran la composición química de la atmósfera, donde se cuentan las emisiones de gases de efecto invernadero y la deforestación. La alteración de cada uno de estos factores modifica el balance entre la energía solar incidente sobre la superficie del planeta y la energía radiada hacia el exterior desde esa misma superficie. El sistema climático reacciona ante cada uno de esos forzamientos, y tales reacciones afectan al ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el proceso continuo de circulación del agua a través de los océanos, la atmósfera y la superficie terrestre. El calor del sol evapora el agua de los océanos, ríos y lagos aumentando la humedad del aire, a medida que este aire cargado de humedad asciende en la atmósfera se enfría, y el agua se condensa formando las nubes, hasta que se supera un cierto grado de saturación que ocasiona las precipitaciones en forma de lluvia, nieve, granizo, etc. Una vez que el agua llega a la superficie terrestre o bien se evapora de nuevo o traspasa la superficie, se infiltra en el subsuelo y forma depósitos de agua subterránea que migran y dan lugar a la formación de ríos, quebradas o se descarga en el mar. El agua que no se evapora ni se infiltra, sino que se escurre por la superficie terrestre forma ríos, lagos y quebradas.

El cambio climático es "un estado alterado del clima que se caracteriza por los cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades, que persiste du-

rante un período muy prolongado, normalmente de decenios o incluso más". El Panel de Expertos en Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC), con base en la observación de varias tendencias, afirma que actualmente el clima global está cambiando: la atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado. La principal contribución al forzamiento radiativo total que recibe el planeta proviene del aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750, debido a actividades humanas. Es por ello que resulta sumamente probable que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento observado desde mitad del siglo XX hasta el presente.

Asimismo, existe una fuerte evidencia que el calentamiento global está cambiando el ciclo hidrológico. Las tendencias a largo plazo de las variables hidrológicas son difíciles de detectar debido a la considerable variabilidad natural en todos los componentes del ciclo hidrológico en el tiempo y el espacio. No obstante, existen evidencias que muestran que los cambios observados en el ciclo hidrológico a sub-escala continental están vinculados con el calentamiento global observado en las últimas décadas. Algunas de estas evidencias son:

- El contenido promedio de vapor de agua en la atmósfera ha aumentado al menos desde la década de 1980, tanto sobre los continentes como sobre los océanos, e igualmente en la parte superior de la tropósfera.
- La precipitación promedio aumentó en la mayoría de las regiones continentales situadas en latitudes altas del hemisferio norte durante el período de 1901 a 2005, y disminuyó entre 10 °S y 30 °N desde la década de 1970.
- Se ha producido un gran incremento de los eventos de fuertes precipitaciones, en particular en las regiones de latitudes medias, e incluso en localidades donde la precipitación total ha disminuido.
- A escala mundial, la humedad del suelo ha disminuido. Las sequías se han vuelto más intensas y prolongadas, especialmente en las zonas tropicales y subtropicales.
- La cobertura de nieve ha disminuido en la mayoría de las regiones, especialmente en primavera y verano; en muchas áreas se ha producido la degradación del permafrost y de los terrenos que se congelan estacionalmente; en el hemisferio norte, en los lugares donde se dispone de datos, la fecha de congelación de ríos y lagos se ha retrasado y la de fusión del hielo se ha adelantado.

- Ha ocurrido una considerable pérdida de masa en la mayoría de los glaciares y los casquetes polares del planeta.

Conforme a los resultados que arrojan los modelos de simulación del clima, es muy probable que los cambios observados durante el siglo XX sean aun mayores en el siglo XXI. Es probable que para finales del presente siglo la temperatura media global aumente entre 1,5 y 4,5 °C con respecto a la del período entre 1850 y 1900. Los cambios que se producirán en el ciclo global del agua como respuesta al calentamiento durante el siglo XXI no serán uniformes. Se acentuará el contraste de las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas, y también entre las estaciones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales.

Los cambios esperados en el ciclo hidrológico son:

- Es probable que para el final del presente siglo, en las latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial se experimente un aumento en la precipitación media anual. Es probable también que la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitud media y regiones subtropicales, mientras que en muchas regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumentará.
- Es muy probable también, para el final del presente siglo, que sean más intensos y frecuentes los fenómenos de precipitación extrema en la mayoría de las regiones terrestres de latitud media y en las regiones tropicales húmedas, conforme vaya aumentando la temperatura media global del planeta.

Estos cambios tendrán efectos tanto directos como indirectos sobre la magnitud y distribución de las aguas de escorrentía, la recarga de las aguas subterráneas y la calidad del agua dulce.

Impactos del cambio climático en la escorrentía y el caudal de los ríos

Las variables climáticas dominantes de la escorrentía y el caudal fluvial son las precipitaciones, la temperatura y la evaporación. Los cambios en el volumen, duración e intensidad de las precipitaciones, y si la precipitación se produce como lluvia o nieve, son los factores que inciden en el caudal de los ríos. La temperatura es particularmente la variable dominante en las cuencas que dependen de las nevadas y en las áreas costeras, esto último debido al aumento del nivel de las

aguas con la temperatura. En las regiones forestales, de producirse un cambio significativo de la evapotranspiración con el aumento de la temperatura, ello podría compensar los pequeños aumentos de la precipitación local y ocasionar un balance negativo en el volumen de las aguas de superficie. Así, cuencas distintas, sometidas a los mismos cambios en las variables climáticas, pueden reflejar impactos muy diferentes; ello depende en gran medida de las características fisiogeográficas e hidrogeológicas de la cuenca, y del volumen de agua que almacenan los lagos y/o las aguas subterráneas presentes en la cuenca.

A escala global, ya existen evidencias de cambios significativos en los patrones de escorrentía anual que están experimentando algunas regiones: se ha observado un aumento de la escorrentía sobre todo en las latitudes más altas, mientras que en otras regiones ha habido una disminución, por ejemplo en partes del Oeste de África, el sur de Europa y el sur de América Latina. No obstante, la atribución de estos cambios solamente a la alteración del clima es difícil debido a la variabilidad natural del clima y a la influencia potencial de otros factores como son los cambios en el uso de la tierra. Sin embargo, si existen evidencias incontestables de que en muchas regiones donde las precipitaciones invernales se producen en forma de nieve, el caudal de los ríos se ha visto alterado debido al aumento de la temperatura. Por ejemplo, un informe del Banco Mundial alerta acerca de la alteración de la hidrología de montaña en Perú, que está siendo ocasionada por el cambio climático, indicando que ya se observan modificaciones de la escorrentía, los lagos andinos y los humedales de montaña, que son fuentes de agua para la generación hidroeléctrica, el suministro de agua potable y de agua para la agricultura.

Se han realizado centenares de estudios acerca del efecto potencial futuro del cambio climático sobre el caudal de los ríos, pero la mayoría han sido estudios regionales, principalmente en Europa, Norteamérica y Australia. Los estudios de escala global muestran que en términos generales el caudal fluvial global tenderá a aumentar pero habrá una variabilidad considerable entre distintas regiones: se estima que aumentará considerablemente en las latitudes altas mientras que en ciertas latitudes medias como el oeste de USA, Europa y Norte de África la tendencia será a disminuir, al igual que en regiones tropicales como Centroamérica y el norte de Suramérica.

En las zonas donde la precipitación cae en forma de nieve, se han realizado una serie de estudios bastante completos que muestran que el calentamiento conducirá

a cambios en la estacionalidad del caudal de los ríos. En las cuencas alimentadas por glaciares, la elevación de la temperatura producirá un incremento del caudal fluvial, y descargas pico en el corto plazo, pero a más largo plazo, la contribución del deshielo de los glaciares al caudal se reducirá gradualmente. En las zonas con poca o ninguna nevada, los cambios en el escurrimiento son mucho más dependientes de los cambios en el régimen de precipitaciones que de la temperatura. Una conclusión general de estos estudios es que aumentaría de estacionalidad, con un aumento del caudal en la temporada de flujo pico con respecto a los patrones actuales, y una reducción del caudal durante temporada de menor flujo y en los períodos de sequía.

Impactos del cambio climático en las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas y la humedad del suelo en conjunto representan más del 98% de los recursos mundiales de agua dulce. El volumen de las aguas subterráneas se correlaciona más fuertemente con la precipitación que con la temperatura, pero la temperatura es un factor importante para los acuíferos poco profundos y especialmente en los períodos de calor.

A diferencia de lo que ocurre con las aguas superficiales, los impactos sobre las aguas subterráneas debido al cambio climático no han sido bien estudiados, ni observados de forma rigurosa. Ello se debe por una parte a que a la gestión de las aguas subterráneas se le suele prestar menos atención que a la gestión de las aguas superficiales, pero también a que las consecuencias ocurren más lentamente, y también a las dificultades inherentes a la medición de los cambios. En general, se ha observado una tendencia decreciente en los niveles de las aguas subterráneas en las últimas décadas, pero esto se atribuye más bien a la extracción excesiva, es decir al bombeo de aguas subterráneas a una tasa superior a la recarga del acuífero.

Las amenazas previsible a las aguas subterráneas como consecuencia del cambio climático son:

- Reducción de la recarga como consecuencia de la reducción de las precipitaciones y cambios en la distribución estacional y/o espacial de la precipitación de lluvia y nieve. La magnitud del cambio en las aguas subterráneas puede variar, dependiendo de las condiciones locales. En algunas zonas, el volumen

de agua de lluvia puede reducirse hasta un nivel inferior al necesario para que se produzca la recarga del acuífero.

- Un cambio rápido hacia un mayor uso de las aguas subterráneas, como consecuencia de la reducción de la disponibilidad y calidad de las aguas superficiales en algunas regiones, lo que implica un mayor riesgo de explotación excesiva del acuífero.
- Contaminación de los acuíferos costeros y la contracción de los lentes de agua dulce en las islas pequeñas debido a la intrusión de agua salada por la elevación del nivel del mar, junto con la contaminación que pudiese provocar la mayor incursión de las mareas debido a las tormentas.
- La salinización de los acuíferos poco profundos a consecuencia de una mayor evapotranspiración, especialmente en las regiones áridas y semiáridas.

Por otra parte, se dispone de muy pocos estudios acerca del impacto futuro del cambio climático sobre las interacciones de las aguas superficiales con las aguas subterráneas. Regionalmente tales impactos serán muy distintos, por ejemplo, las proyecciones indican que en el año 2050 puede producirse una recarga significativamente menor (hasta un 70% menos) en los acuíferos del noreste de Brasil, en la región occidental del sur de África y a lo largo de la cuenca sur del Mediterráneo, mientras que la recarga puede aumentar en algunas zonas donde se prevé que las precipitaciones aumenten considerablemente. En algunos lugares donde los recursos de agua subterránea son limitados, esto último puede ayudar a aliviar las presiones sobre los recursos hídricos subterráneos y superficiales. Sin embargo, en las zonas donde el nivel del acuífero es alto, la mayor recarga puede dar lugar a problemas de anegamiento y salinización de los suelos.

Impacto del cambio climático sobre la calidad de las aguas

La información disponible acerca de los impactos ocasionados hasta el presente sobre la calidad de las aguas es poca. Se han reportado aumentos de temperatura en lagos y ríos de Europa, América, África, Asia y en la Antártida en décadas recientes; ello ha ocasionado cambios en la composición de especies acuáticas, en la abundancia y productividad de organismos y desplazamientos fenológicos. Por ejemplo, desde 1954 las aguas del lago de Zúrich, a 5 metros de profundidad, se han calentado en promedio 0,016 °C de un invierno a otro, y 0,031 °C de un verano a otro, totalizando un aumento hasta el presente de algo más de 1 °C en

invierno y 2 °C en verano, mientras que el aumento de la temperatura a mayor profundidad ha sido menor.

Este calentamiento de las aguas lacustres puede dar lugar a la proliferación de cianobacterias. En efecto, el aumento de la temperatura es uno de los factores que incide en la multiplicación de las cianobacterias. En condiciones favorables estos organismos pueden formar capas visibles en la superficie de las aguas, lo cual ocasiona impactos tales como conferirle un olor y un sabor desagradable al agua, e igualmente pueden producir cianotoxinas que bajo ciertas circunstancias pudieran representar un riesgo de salud. Así, si la tendencia del aumento de la temperatura se mantiene a futuro, pudiesen formarse cianobacterias muy tóxicas del género *Microcystis*, ocasionando una degradación masiva de la calidad del agua.

Otro efecto probable es que las aguas lacustres al calentarse se mezclarán con menos frecuencia e intensidad. Es decir, que el calentamiento global podría afectar también la distribución vertical del calor en la columna agua y, por tanto, la estratificación y mezcla de las aguas del lago. Al respecto, se han desarrollado algunos modelos para interpretar este efecto. Así, en lagos de zonas templadas, se observa que sus aguas se mezclan bastante bien durante la estación invernal y ello se debe a que el agua tiene una temperatura uniforme en toda la columna de agua (homotermia), pero en verano, con el calor, suele ocurrir una estratificación con temperaturas superficiales altas y temperaturas bajas en el fondo, lo cual impide la mezcla en la columna de agua. Bajo el efecto del cambio climático, las capas superficiales de los lagos (epi y metalimnion) se calentarán durante las próximas décadas. En una primera etapa de transición habrá poca estratificación térmica, pero progresivamente se irá prolongando el estancamiento de las aguas en verano, lo cual reducirá el período de homotermia y se reducirá por tanto, la frecuencia e intensidad de la mezcla de las aguas. Ello puede conducir a una reducción significativa del contenido de oxígeno en el agua en el fondo del Lago. En términos generales, en los lagos cubiertos de hielo en invierno se espera que ocurra todo lo contrario: se congelarán cada vez más tardíamente y el hielo se derretirá cada vez más temprano, y esa reducción de la duración de la cobertura de hielo hará que la mezcla de las aguas se intensifique, mejorando el grado de oxigenación de las aguas profundas.

Los estudios realizados con respecto a la variación de otros parámetros de calidad de aguas, tales como la salinidad y los nutrientes, con el calentamiento, no han

arrojado observaciones consistentes. Asimismo, no existen evidencias de afectación de la erosión y del transporte de sedimentos debido al cambio climático.

Si bien los impactos detectados son menores, a futuro esto pudiese cambiar drásticamente. Según el IPCC el aumento de la temperatura en ríos y lagos, aunado a la mayor intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, afectarán la calidad de las aguas y propiciarán diversas formas de contaminación. A este respecto se prevé que ocurran los siguientes impactos:

- El aumento de la temperatura del agua reducirá la solubilidad del oxígeno, aumentará la estratificación y reducirá la mezcla del agua en los lagos, e incidirá en otros procesos bioquímicos en los lagos y embalses, así como en la capacidad de asimilación y descomposición de desechos orgánicos por los ríos.
- Al incrementarse la intensidad de las precipitaciones, aumentará por un lado la dilución, pero por el otro, aumentará también la carga de sedimentos debido al aumento de la erosión por la escorrentía, que arrastrará mas nutrientes, organismos patógenos y toxinas a los cuerpos de agua.
- Al producirse períodos más largos de flujos bajos de agua se reducirá la capacidad de dilución y la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, aumentará la proliferación de algas y todo ello conducirá al aumento de la contaminación del agua, que a su vez tendrá consecuencias sobre la salud humana, los ecosistemas y el suministro de agua.
- Al reducirse el nivel del agua en los lagos por la incidencia de períodos de sequía más prolongados, se puede producir una re-suspensión de los sedimentos del fondo y alterarse el ciclo de los nutrientes.
- Al aumentar el nivel del mar podría aumentar la intrusión de agua salada en los estuarios y acuíferos próximos a la costa.

Incidencia de las inundaciones y sequías

Para entender la incidencia del cambio climático es necesario tener en consideración, por una parte, que la ocurrencia de eventos de inundación y sequía no se debe solamente a las condiciones climáticas, y por otra que los términos “inundación” y “sequía” engloban una amplia gama de significados. Las inundaciones incluyen los desbordamientos de los ríos, las crecidas repentinas, las inundaciones urbanas, el desbordamiento del alcantarillado y las inundaciones costeras entre

otras. Asimismo, se utiliza el término sequía para la sequía meteorológica cuando las precipitaciones son muy por debajo del valor medio, la sequía hidrológica cuando se reduce el caudal de los ríos y/o los niveles de agua en los ríos, lagos y aguas subterráneas, la sequía agrícola cuando baja la humedad del suelo y la sequía ambiental que es una combinación de las anteriores.

Aún cuando las inundaciones dependen de una serie de factores no-climáticos, como por ejemplo la existencia de presas o diques, se dispone de indicios de que el cambio climático ya está ocasionando un impacto en la intensidad y frecuencia de estos eventos. A escala mundial el número de eventos catastróficos por década debido a las inundaciones fluviales en el período 1996-2005, fue el doble con respecto a los que ocurrieron entre 1950 y 1980. Este incremento ha sido atribuido al aumento de la frecuencia de las precipitaciones fuertes. Con respecto a la evolución del caudal de los ríos, hasta el presente no se ha observado una variación significativa que indique que se haya producido un aumento generalizado.

Una recopilación y análisis de los eventos climáticos catastróficos y no-catastróficos ocurridos en Venezuela durante el periodo entre 1987 y 2008 revela que el número total de eventos por año no varió significativamente durante el período entre 1987 y 1999, pero a partir de entonces se ha estado registrando una tendencia creciente, aunque discontinua, impulsada principalmente por las inundaciones y en menor medida por las fuertes lluvias (Figura 1). Esta es una tendencia que parece concordar con las consecuencias esperadas del calentamiento global.

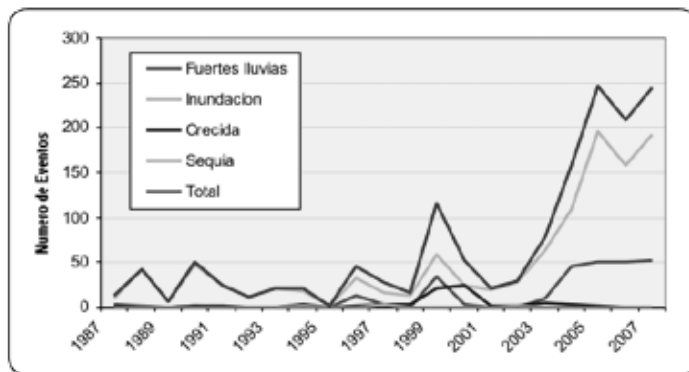


Figura 1. Evolución del número de eventos climáticos en Venezuela durante el período 1987-2008

Lo cierto es que a medida que crece la población mundial, más personas vivirán y trabajarán en áreas susceptibles de desastres climáticos, particularmente en áreas inundables y terrenos inestables, y cabe esperar que esta tendencia, aunada al incremento de eventos como consecuencia del cambio climático, van a incidir cada vez más en el aumento de las pérdidas materiales y humanas por desastres en el futuro.

A escala global, desde la década de 1970, los eventos de sequía también se han hecho más frecuentes, especialmente en las regiones tropicales y sub-tropicales. El IPCC también concluyó que es probable que las zonas afectadas por la sequía hayan aumentado desde la década de 1970. En las regiones que fueron más afectadas por la sequía, medida esta mediante el Índice de Severidad de Palmer, ello se debió a la disminución de las precipitaciones y al aumento de la temperatura, que a su vez aumentó la evapotranspiración y redujo la humedad.

Con respecto a los eventos catastróficos climáticos futuros, el IPCC señala que de mantenerse la tendencia mundial de emisiones de gases de invernadero en el presente siglo, la intensidad y frecuencia de las olas de calor y lluvias torrenciales tienen una probabilidad muy alta (superior al 99%), mientras que para las sequías y ciclones tropicales intensos la probabilidad es alta (superior al 66%) Ver Cuadro 1.

Estos escenarios expresan que el cambio esperado en las condiciones futuras del clima y en particular el aumento de la temperatura, traerá consigo numerosos riesgos para el conjunto de la sociedad y sus actividades, convirtiéndose así es un factor extra que incrementará la vulnerabilidad ya existente en numerosos países. Por ejemplo, Naciones Unidas reporta que actualmente, a escala mundial, unos 1.100 millones de personas no tienen acceso al agua potable y unos 5 millones de personas/año mueren por enfermedades relacionadas con el agua. La salud humana es altamente dependiente de la disponibilidad de agua, y ésta también será ahora afectada por el cambio climático.

Tendencia de alteración del clima	Certitud de ocurrencia en el Siglo XX	Probabilidad de ocurrencia en el siglo XXI
Días y noches frías menos frecuentes y más cálidos	Muy probable > 90%	Virtualmente cierto > 99%
Días y noches calurosas más frecuentes y más cálidas	Muy probable > 90%	Virtualmente cierto > 99%
Olas de calor: mayor frecuencia en la mayoría de las zonas terrestres	Probable > 66%	Muy probable > 90%
Fuertes precipitaciones: mayor frecuencia en la mayoría de las zonas terrestres	Probable > 66%	Muy probable > 90%
Zonas afectadas por el aumento de las sequías	Probable en muchas regiones > 66%	Probable > 66%
Aumento de la actividad de ciclones tropicales intensos	Probable en muchas regiones > 66%	Probable > 66%
Aumento de la incidencia de la altura del nivel del mar	Probable > 66%	Probable > 66%

Cuadro 1. Alteraciones recientes y proyecciones futuras del clima global, de mantenerse la tendencia mundial de emisiones de gases de invernadero.

En síntesis, la incidencia del cambio climático sobre los recursos hídricos en las próximas décadas puede describirse como la alteración de tres variables que son: el volumen de recurso disponible, la calidad del agua y la estacionalidad del flujo de las aguas.

La cantidad de recurso es el volumen de agua que se establece según el balance entre lo que ingresa al sistema natural, bien sea por la precipitación, la escorrentía, o por afloramiento de aguas subterráneas, y las salidas o egresos por las extracciones de agua, evapotranspiración, o salidas naturales. A escala mundial, como se ha referido, la precipitación va a disminuir en cantidad acumulada anual, pero se producirán eventos de lluvia más intensos. A escala local, los cambios pueden ser muy significativos. Los más notables corresponden a la cantidad de agua que se producirá con las precipitaciones extremas que ocasionará inundaciones más frecuentes, y también a la ocurrencia de sequías más intensas y prolongadas. A consecuencia de ello, los lagos y los humedales sufrirán cambios radicales de volumen.

La calidad del agua se refiere a lo adecuada que pueda resultar una fuente de agua natural para determinados "usos", ya sean usos biológicos o económicos. Así, vemos por ejemplo como muchas especies de peces sólo pueden subsistir en aguas que poseen valores de oxígeno disuelto, temperatura del agua, minerales disueltos y pH dentro de intervalos bien delimitados. Asimismo, los seres humanos, por razones de salud ven limitados los usos del agua, sea para consumo o higiene, si esta posee niveles excesivos de minerales disueltos o tiene un pH muy alto o muy bajo. Los cambios esperados en la calidad del agua contribuirán a alterar la composición de los ecosistemas acuáticos, la manera en que estos funcionan y los servicios que ofrecen, poniendo en riesgo la subsistencia de las especies más vulnerables y alterando la capacidad de resiliencia del ecosistema. El aumento de la temperatura del agua tendrá un impacto en los lagos y embalses, afectando su productividad y la distribución de peces y flora, incrementará la proliferación de algas, y ello conducirá a la aparición de problemas de olor y sabor en el agua potable. Asimismo, las sequías empeorarán aún más la incidencia de enfermedades diarreicas y otras enfermedades relacionadas con el agua, especialmente en los países en desarrollo.

La estacionalidad es la variación esperada de la cantidad promedio de agua o de los flujos de agua durante un período de tiempo determinado, por ejemplo, durante un año. Muchas especies acuáticas y terrestres son muy sensibles a la estacionalidad del agua. La Selección Natural ha adaptado, a lo largo de la evolución el comportamiento, la fisiología y el proceso de desarrollo de muchas especies acuáticas, en particular los patrones de distribución espacial tales como el desove durante las inundaciones o desbordamiento de los ríos, o el crecimiento acelerado de algunos batracios de renacuajos a adultos en humedales que se secan con rapidez. Los cambios de la estacionalidad del agua ocasionarán alteraciones del hábitat acuático que resultarán perjudiciales al comportamiento de las especies. A su vez, estos cambios pueden afectar a las poblaciones de peces y otras especies comerciales, y a las industrias conexas.

Perspectivas

Los impactos adversos futuros del cambio climático sobre los recursos hídricos no deben ser necesariamente considerados de manera fatalista, porque pueden ser atenuados si se logran concertaciones internacionales para tal propósito. Lo fundamental es que los gobiernos, la sociedad civil, líderes empresariales y trabajado-

res logren establecer sistemas, estructuras y actitudes que permitan la reducción de las emisiones de gases de invernadero y la realización de proyectos e iniciativas de adaptación a las nuevas condiciones del clima. En tal sentido el reciclaje, la conservación y el uso eficiente del agua y la energía, el desarrollo de las energías renovables, nuevas normas de construcción para edificios e infraestructuras, un reordenamiento territorial que mejore el acceso a los servicios y brinde más oportunidades a las áreas rurales, mejoras en la gestión de tierras agrícolas y detener la deforestación serían de gran ayuda.

En efecto, las estrategias para el control del cambio climático son de dos tipos: la mitigación que consiste en la reducción de las emisiones de gases de invernadero, y la adaptación a las nuevas condiciones del clima. Son estrategias complementarias, sin embargo, la mayor responsabilidad con respecto a la mitigación de las emisiones está en manos de los países desarrollados y las economías emergentes (China, India, Brasil, Sudáfrica) que son los países que proporcionalmente emiten mayores cantidades de gases a la atmósfera, y poseen tanto las tecnologías que permitirían su reducción, en distintos grados de desarrollo, como los recursos financieros para su perfeccionamiento y despliegue. En tal sentido, la contribución de los países en desarrollo a la mitigación, aunque es necesaria para evitar un crecimiento desproporcionado de las emisiones a futuro, es limitada y dependiente de que se pueda llevar a cabo una transferencia de tecnología desde los países desarrollados de una manera expedita y en condiciones razonables. En espera de que se logren tales acuerdos, los países en desarrollo están obligados a adoptar medidas de adaptación a las nuevas condiciones del clima, para reducir sus consecuencias adversas.

Entre estas medidas están aquellas para evitar que se sigan asentando comunidades en áreas susceptibles de inundación, deslizamientos y terrenos inestables e ir desalojándolas de aquellas áreas vulnerables que actualmente están ocupadas, fortalecer los establecimientos de salud, mejorar los planes de contingencia ante las emergencias, mejorar las infraestructuras de almacenamiento y suministro de agua, propiciar el reciclaje del agua, desarrollar nuevas variedades de cultivos conforme a las nuevas condiciones del clima, adaptar los periodos de siembra a los cambios en las precipitaciones, incorporar biotecnologías que mejoren la productividad en el sector agrícola, mejorar los sistemas de riego, re-localización o protección mediante diques y barreras de las infraestructuras costeras importantes

bajo riesgo, entre muchas otras. Se trata de decisiones que requieren de un orden de prioridad, por su demanda de recursos financieros y tecnológicos, y cuyo establecimiento requiere de un conocimiento más preciso de los impactos del cambio climático en cuanto a su ocurrencia temporal y localización geográfica, lo cual resalta la importancia de reforzar las mediciones del clima en todo el territorio nacional, implantar sistemas de alertas tempranas de manifestaciones climáticas extremas y estimular al sector ciencia y tecnología para impulsar la investigación y el desarrollo relativo al cambio del clima, vulnerabilidades regionales y formas de contrarrestarla. La puesta en práctica oportuna de estas acciones ayudará a aminorar las consecuencias sociales, económicas, de salud y las migraciones de poblaciones rurales y costeras por los efectos del cambio climático y principalmente por los efectos sobre los recursos hídricos.

En el campo de la mitigación, los esfuerzos de los países en desarrollo deberían enfocarse, por una parte hacia el uso racional de la energía, mediante un aprovechamiento más racional, y en lo posible en aumentar la eficiencia de uso, por ser el sector de la energía donde se genera la mayor proporción de las emisiones. Pero en el caso de países con bosques tropicales, la reducción de las tasas de deforestación también representaría una contribución significativa, en virtud de la absorción y retención del CO₂ por la actividad fotosintética de los mismos.

Referencias

IPCC. 2007. Summary for policymakers. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B., Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

BATES, B.C.; KUNDZEWICZ; Z. W.; WU,S.; and PALUTIKOF,J.P. Eds. 2008: *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

IPCC. 2013. Climate Change 2013. *The Physical Science Basis*. WGI Technical Support Unit c/o University of Bern Zaehringstrasse 25. 3012 Bern. Switzerland.

KUNDZEWWICK, Z.W.; MATA,L.J.;ARNELL,N.W.;DOLL,P., KABAT,P.;JIMENEZ, B.;MILLER, K.A.;OKI, T.; SEN,Z. and SHIKLOMANOV,I.A. 2007: *Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK , 173–210.

BATES, B.C.; KUNDZEWICZ; Z.W.; WU, S.; and PALUTIKOF, J.P. Eds. 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

WORLD BANK, 2009. *Assessment of climate Impact on Peru's hydrology. Development of a methodology*. Progress Report N° 1.

MILLY, P.C.D.; DUNNE,K.A.;and VECCHIA,A.V. 2005. *Global pattern of trends in streamflowandwater availability in a changing climate*. Nature 438(17): 347–350.

LIVINGSTONE, D.M. 2003. *Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake*. ClimaticChange 57, 205 –225.

LIVINGSTONE, D.M. 2008. *A change of climate provokes a change of paradigm: taking leave of two tacit assumptions about physical lakeforcing*. International Review of Hydrobiology 93 (4–5), 404–414.

PEETERS, F.; LIVINGSTONE, D.M.; GOUDSMIT, G.H.; KIPFER, R.; and FORSTER, R. 2002. *Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large-central European lake*. Limnology and Oceanography 47, 186 –197.

REMPFER, J. 2007. *An analysis of long-term historical deep-water oxygen concentrations in lakes of differing trophic status*. Diplomarbeit, Universität Bayreuth, Deutschland.

LIVINGSTONE, D.M. 2004. *Ice Cover of lakes and rivers. Climate trends from historical records*. Eawag News 58, 19 –22.

SANCHEZ, J.C. 2010. *El cambio climático y su impacto en Venezuela*. Publicación de la Cámara de Aseguradores de Venezuela. Caracas.