

# Recursos hídricos y cambio climático: una visión desde México

Ortiz Haro, G.A.<sup>1,2</sup>, Gress Carrasco, F.<sup>2,3</sup>, Mazari Hiriart, M.<sup>2</sup>

## Antecedentes

La creciente demanda de recursos hídricos directamente relacionada con el crecimiento poblacional y la degradación ambiental, asociada a una demanda de recursos naturales sin precedente en la historia de la humanidad, así como su desigual distribución espacial y temporal es un tema de gran relevancia. Se conjuntan en este escenario los cambios de uso de suelo, la urbanización y concentración de más de la mitad de la población mundial en centros urbanos, la expansión de la actividad agrícola y pecuaria para la provisión de alimentos, la industrialización, los crecientes requerimientos de combustibles y la necesidad de conservar ecosistemas que proveen a los habitantes de la Tierra de un medio ambiente sano, con diversos medios de vida y posibilidades de adaptación al cambio climático (CC)<sup>4 5</sup>. Se presentan problemas por la falta de provisión de agua en cantidad suficiente y de calidad adecuada, así como serias deficiencias en las condiciones sanitarias para el tratamiento y la disposición adecuada de aguas residuales. Condiciones que se verán exacerbadas por las modificaciones en los patrones de precipitación y las variaciones de temperatura que sucederán de manera desigual, heterogénea e impredecible. El Foro Económico Mundial (FEM) predice que el mayor impacto social durante los próximos diez años será por crisis hídricas, a la par de la dispersión de enfermedades infecciosas, incapacidad para la adaptación al cambio climático, así como pérdida y colapso de la biodiversidad, lo que implica riesgos interconectados con efectos a largo plazo a nivel mundial.

A lo largo del territorio se presentan fenómenos meteorológicos extremos, como son olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios que revelan la vulnerabilidad y exposición a riesgo de ciertos ecosistemas, así como los sistemas urbanos con precipitaciones pluviales, que

---

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

<sup>2</sup> Laboratorio de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, UNAM

<sup>3</sup> PRONACE 2021-2023, CONACYT 317663 (ICAT-ICAYCC-IE-FA/UNAM)

<sup>4</sup> Cosgrove, W. J., & Loucks, D. P. (2015). *Water management: Current and future challenges and research directions*. *Water Resources Research* 51(6), 4823-4839. <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>

<sup>5</sup> WEF. 2015. *Global Risk 2015*. 10th edition. Geneva.

son cada vez más comunes e intensas, ocasionando diversas vulnerabilidades asociadas al clima<sup>6</sup>

7 8 9 10

La información que se presenta a continuación refleja el estado del arte de la investigación del cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos epicontinentales del país. Se recopilaron y analizaron 62 documentos correspondientes al periodo 1980-2022, de los cuales el 79% son artículos científicos y el 21% corresponde a capítulos de libro, informes, reportes técnicos, atlas y otro tipo de documentos que abordan la información existente y disponible sobre los recursos hídricos en el contexto de CC. En México la investigación sobre el cambio climático se encuentra dispersa, y existen estudios aislados por regiones específicas, datos publicados en artículos científicos, informes técnicos, reportes gubernamentales, —por lo general no actualizados—, mismos que se han recopilado con base en palabras clave: cambio climático, precipitación, sistemas acuáticos, sistemas hídricos, precipitación, impactos, riesgos, cuenca, y vulnerabilidad.

***Existe un sesgo geográfico notorio en las investigaciones de cambio climático y recursos hídricos en México, particularmente concentrados en las regiones norte y centro del país.***

El mayor número de investigaciones sobre CC y recursos hídricos se concentran en la región noroeste (23%), aunado a un número importante de investigaciones que analizan más de una región de estudio (21.3%). También existe una importante concentración de estudios en las regiones centro norte y centro sur del país (véase **Figura 1**).

---

<sup>6</sup> González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M., & Arriaga-Medina, J. (2015). *Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change*. In: Gebriye, S. S. & Concepcion, D. M., eds. *Sustainability of Integrated Water Resources Management*. Springer, Cham. 181-195.

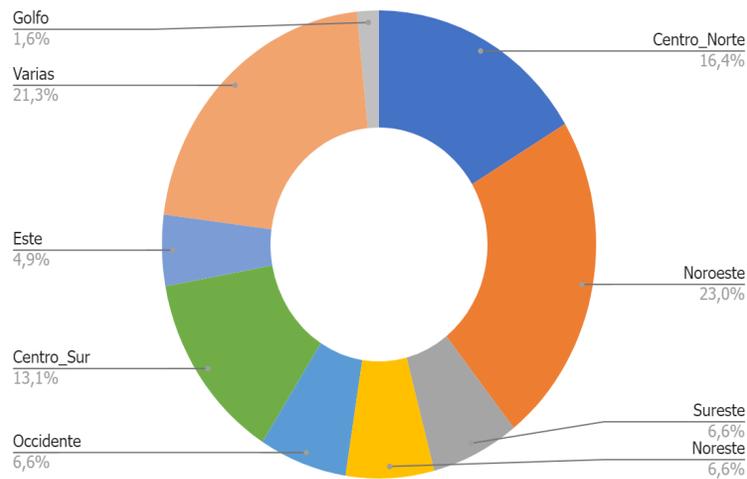
<sup>7</sup> González, M. L. G., Escobar, Y. C., & Jiménez, H. (2007). *La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático*. *Ingeniería y competitividad* 9(1), 19-29.

<sup>8</sup> Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). *Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68(3), 409-427.

<sup>9</sup> SEMARNAT-INECC. (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

<sup>10</sup> Arreguín Cortés, F., López Pérez, M., & Montero Martínez, M. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático: efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*.

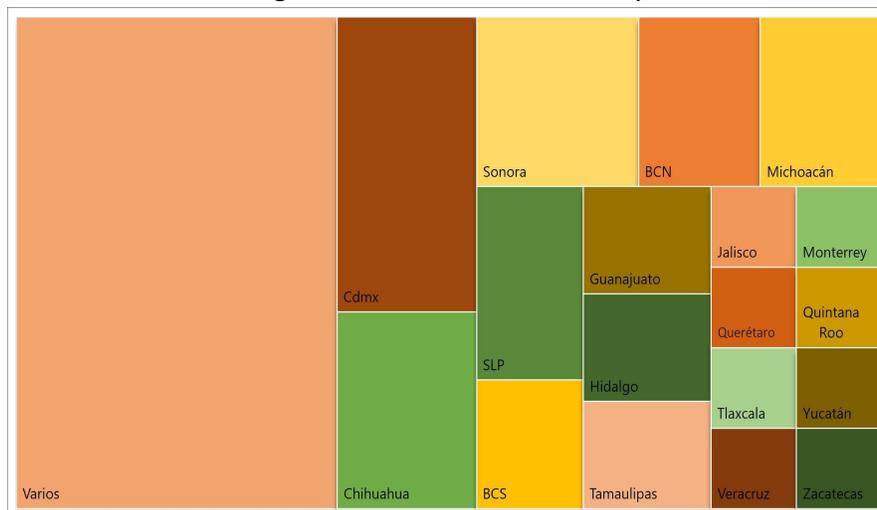
**Figura 1.** Distribución de las investigaciones de cambio climático y recursos hídricos en las regiones de México.



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las investigaciones contemplan un dominio geográfico de varios estados (véase **Figura 2**), esto se debe a que más del 50% de los estudios se ha realizado a la escala de cuenca o de Región Hidrológica. Otras escalas de estudio son a nivel nacional (15%) y en regiones hidrológicas, microcuencas, Golfo de México, entre otras (15%).

**Figura 2.** Distribución de las investigaciones de CAMBIO CLIMÁTICO y recursos hídricos a nivel estatal.



La categoría de varios se refiere a estudios que consideraron más de un estado o que están a nivel nacional. Casos como Morelia, Nuevo León y Tijuana se insertaron en sus respectivos estados.

Fuente Elaboración propia.

Este sesgo geográfico puede deberse a que mucha de la investigación sobre los recursos hídricos y los efectos negativos del CC realizada hasta el momento, se ha enfocado a contextos de grandes territorios agrícolas y urbanos, que exploran los riesgos vinculados con cambios en la disponibilidad de agua en zonas urbanas y sobreexplotación de acuíferos por irrigación intensiva en zonas áridas.

***Se observa poca diversidad de enfoques empleados en la investigación de CC y recursos hídricos, la mayoría centradas en la modelación del clima y en el análisis de la vulnerabilidad climática e hídrica.***

Gran cantidad de estudios están enfocados en la modelación climática y en sus efectos potenciales sobre la disponibilidad de agua (24%). Otros estudios están centrados en simulaciones climáticas y de balance hídrico para identificar cambios observados y proyecciones futuras de precipitación, disponibilidad, escurrimiento, infiltración y recarga de agua. Algunos estudios se enfocan sobre la gestión integrada de cuencas ante el CC, análisis hidrometeorológico, gestión de riesgos, cambios en tendencias de precipitación, así como en las perspectivas y evolución de los recursos hídricos ante el contexto del CC (24%). Otros más abordan la vulnerabilidad del recurso hídrico (11%), como vulnerabilidad de peligros hidrológicos, vulnerabilidad y seguridad hídrica, o la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua.

***La disponibilidad natural del agua ha disminuido en los últimos años, situación que se torna más crítica con una distribución desigual bajo escenarios de cambio climático.***

De acuerdo con datos oficiales de monitoreo de la cantidad del agua disponible<sup>11</sup>, en México se explotan 451,585 millones de m<sup>3</sup> de agua anuales; 61% procedente de sistemas de agua superficial, y 39% de agua subterránea. Los usos de los volúmenes concesionados son: 59% agricultura, 27.5% abastecimiento público y 13.5% para industria autoabastecida<sup>12</sup>, mientras que el uso pecuario se encuentra subvaluado, al reportar el 0.2% y 0.5% de concesiones de agua superficial y subterránea, respectivamente. En el Registro Público de Derechos de Agua

---

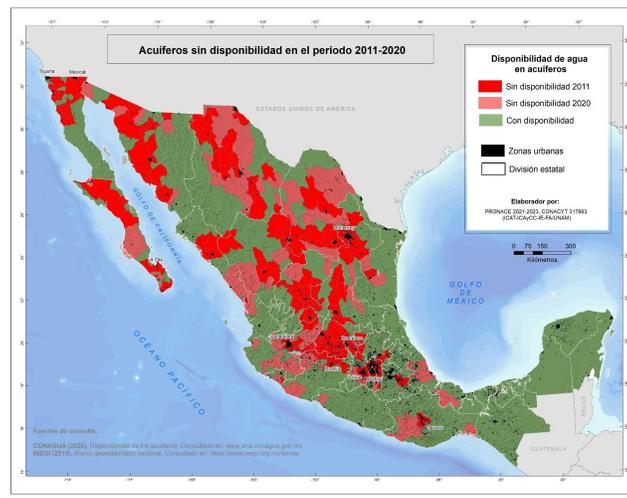
<sup>11</sup> CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Planeación.

<sup>12</sup> CONAGUA. (2020a). *Localizador de Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales*. <https://sigagis.conagua.gob.mx/locrepda20/>

(REPDA)<sup>13</sup> se reporta que el 40% del volumen de descarga de aguas residuales es de origen industrial, 17.5% de público urbano y 15.6% del uso en acuicultura, que son vertidos a arroyos, lagos, lagunas, ríos y océanos, llegando eventualmente a los sistemas de agua subterránea, y alterando paulatinamente las dinámicas hídricas en los diversos ecosistemas.

En cuanto a los sistemas de agua subterránea, se ha reportado agotamiento en la disponibilidad; a nivel nacional se pasó de 178 acuíferos sin disponibilidad en 2011, a 275 en 2020<sup>14</sup>, distribución asociada con la disponibilidad de agua en zonas urbanas como las de Monterrey, Tijuana, Mexicali, La Paz, Guadalajara, Ciudad de México, Toluca, Morelia, Querétaro, San Luis Potosí, Oaxaca, por mencionar algunas (véase **Figura 3**).

**Figura 3.** Acuíferos sin disponibilidad en el periodo 2011-2020



Fuente: CONAGUA (2020) Consultado en [www.sina.conagua.gob.mx](https://www.sina.conagua.gob.mx); INEGI (2019) Marco geoestadístico nacional. Consultado en: <https://inegi.org.mx/temas>

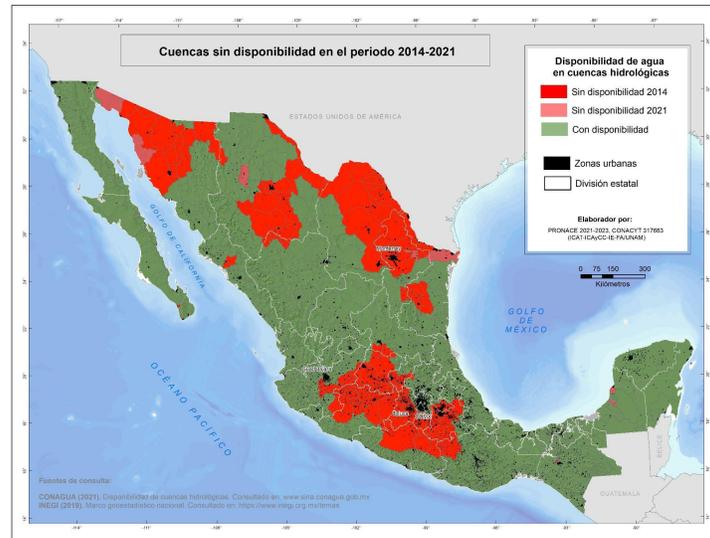
Respecto a la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas, de las 757 cuencas consideradas en el periodo de 2014 a 2021, se identifican actualmente 104 cuencas en la categoría “sin disponibilidad”; en las cuales el volumen total de agua renovable tanto superficial como

<sup>13</sup> CONAGUA. (2020a). *Localizador de Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales*. <https://sigagis.conagua.gob.mx/locrepda20/>

<sup>14</sup> CONAGUA. (2020b). *Disponibilidad de acuíferos*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos>

subterránea ya no ocurre en forma natural, lo que lleva a considerarlas regiones con sobreexplotación, concentradas en la región centro y norte del país (véase **Figura 4**).

**Figura 4.** Cuencas sin disponibilidad en el periodo 2014-2021



**Fuente:** CONAGUA (2020) Consultado en [www.sina.conagua.gob.mx](http://www.sina.conagua.gob.mx); INEGI (2019) Marco geoestadístico nacional. Consultado en: <https://inegi.org.mx/temas>

En los acuíferos del país se reporta una explotación intensiva, con una disponibilidad comprometida en un 42%<sup>15</sup> y la infraestructura para proveer de agua a zonas urbanas es cada vez más compleja; situación que aumentará bajo escenarios de cambio climático. De los 653 acuíferos registrados en el país, el 58% del agua subterránea es extraída de 101 acuíferos sobreexplotados<sup>16</sup>.

Escolero y colaboradores<sup>17</sup> resaltan que se presenta “un clima más extremo con lluvias y sequías más intensas, aunado a una menor capacidad y resiliencia de las cuencas para amortiguar y regular los efectos del cambio climático”. Se prevé con escenarios de cambio climático que la

<sup>15</sup> CONAGUA, (2020b). *Disponibilidad de acuíferos*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuifero>

<sup>16</sup> Arreguín-Cortés, F. I., & López-Pérez, M. (2013). *Impacts of climate change on the hydrological cycle in Mexico*. *International Journal of Water Resources Development*, 29(2), 172-183. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2012.721712>

<sup>17</sup> Escolero, F. O., Martínez, S. E., Kralisch, S. & Perevochtchikova, M. (2009). *Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto del cambio climático*.

tendencia de disminución de precipitación siga en aumento, y en relación directa con el incremento en la temperatura. Se espera un periodo de escasez que afectará el norte y centro del país, mientras que el sur y sureste podrían verse perjudicados por su exceso<sup>18 19 20 21 22 23 24 25</sup>. Además, en las grandes ciudades como la Ciudad de México, las regiones que abastecen a esta urbe ya sufren de una importante vulnerabilidad a la escasez, inundaciones y enfermedades transmitidas por el agua<sup>26</sup>.

***La demanda de agua se ha incrementado en los últimos años, y se acrecentará bajo diferentes escenarios de cambio climático, cambio de uso de suelo y crecimiento poblacional.***

Junto con los impactos del CC se conjuntan múltiples estresores no climáticos como son crecimiento urbano, crecimiento poblacional, cambio de uso de suelo, sobreexplotación de

---

<sup>18</sup> Sosa-Rodríguez, F. S. (2012). *El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional*. Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades, SOCIOTAM, 12(2), 165-187.

<sup>19</sup> Pérez, A. Á., García, R. V., Corral, J. A. R., & Pérez, A. L. S. (2020). *Efecto del cambio climático a partir de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 del año 2050 en el balance hídrico del Área Natural Protegida La Primavera, Jalisco, México*. Áreas Naturales Protegidas SCRIPTA 6(1), 53-74. <https://doi.org/10.18242/anpscripta.2020.06.06.01.0004>

<sup>20</sup> Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E. M., Gordillo-Martínez, A. J., González-Ramírez, C. A., Suárez-Sánchez, J., & Muñoz-Nava, H. (2018). *El cambio climático y la disponibilidad de agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México*. Revista Iberoamericana de Ciencias, 5, 40-51.

<sup>21</sup> Deng, C., Pisani, B., Hernández, H., & Li, Y., (2020), *Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72 (2), A150819. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n2a150819>

<sup>22</sup> Herrera-Pantoja, M., & Hiscock, K. M. (2015). *Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico*. Environmental Science & Policy, 54, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>

<sup>23</sup> López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). *Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México*. Tecnología y ciencias del agua, 8(1), 105-114.

<sup>24</sup> Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México*. Tecnología y ciencias del agua, 3(1), 5-20.

<sup>25</sup> Bravo-Cadena, J., Pavón, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G., & Razo-Zarate, R. (2021). *Water Availability–Demand Balance under Climate Change Scenarios in an Overpopulated Region of Mexico*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(4), 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041846>

<sup>26</sup> Romero Lankao, P. (2010). *Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?*. Environment and urbanization, 22(1), 157-178.

acuíferos y aguas superficiales, para el sector agrícola, ganadero e industrial, lo cual tendrá consecuencias mayores en la disponibilidad de agua para diversas regiones del país, en especial en la región norte y centro.

El cambio de cobertura vegetal durante los últimos 20 años muestra una disminución significativa de la infiltración; siendo la conversión de terrenos para cultivos un factor importante de cambio de uso; cerca de 3,700 km<sup>2</sup> de suelos sufrieron este proceso anualmente entre 1993 y 2000. La península de Yucatán mostró los cambios más abruptos, así como Veracruz, Guerrero y Nayarit<sup>27</sup>. En el periodo 1985-2014 se perdió el 21% de vegetación primaria, el 27% de bosques primarios y el 34 % de selvas<sup>28</sup>, lo que disminuye la capacidad de infiltración y regulación de escorrentía de cuencas altas a cuencas bajas.

Desde mediados del siglo XX, el número de mexicanos se ha casi cuadruplicado, pasando de 25.8 a 126.7 millones de habitantes. Se espera que para el año 2030, la población ascienda a 138 millones de personas, superando 35 ciudades del país un tamaño superior a de 500,000 habitantes. Este incremento poblacional traerá consigo un aumento en la demanda de los servicios públicos por los diferentes sectores, incluido el suministro de agua<sup>29</sup>. La velocidad y escala de urbanización son mucho mayores que en el pasado, lo que implica una serie de nuevos problemas en las ciudades. Por ejemplo, en las ciudades medias el crecimiento poblacional está siendo más acelerado que en las megaciudades y sobrepasa la capacidad de proveer la infraestructura necesaria para el funcionamiento de estas ciudades (véase **Figura 5**). Lo anterior

---

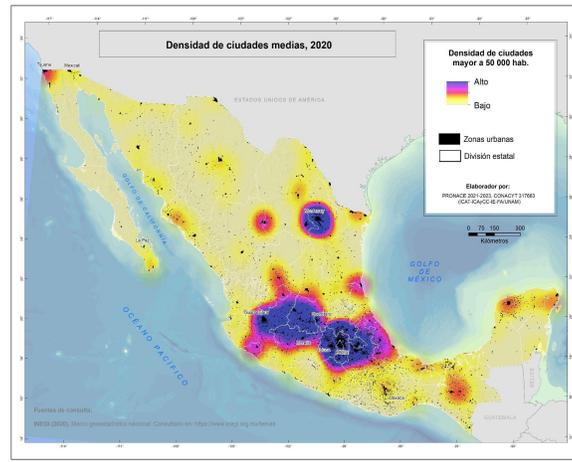
<sup>27</sup> SEMARNAT. (2002). *Compendio de Estadísticas Ambientales*. [https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/Presentacion/index.htm](https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/Presentacion/index.htm) (acceso 3 de octubre 2022).

<sup>28</sup> INEGI. (2017). *Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI. escala 1:250 000*. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017\\_12\\_01.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/especiales/especiales2017_12_01.pdf)

<sup>29</sup> CONAPO. (2019). *Proyecciones de la población de México y de las entidades federativas 2016-2050*. [http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Cuadernillos/33\\_Republica\\_Mexicana/33\\_RMEX.pdf](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Cuadernillos/33_Republica_Mexicana/33_RMEX.pdf) (acceso 3 de octubre 2022).

compromete la seguridad hídrica, ya que hasta el año 2000 más del 75% de la población urbana se ubicaba en zonas de baja disponibilidad y alto estrés hídrico<sup>30</sup>.

**Figura 5.** Densidad de ciudades medias, 2020



Fuente: INEGI (2020) Marco geoestadístico nacional. Consultado en <https://www.inegi.org.gob.mx/temas>

***Se esperan impactos importantes del CAMBIO CLIMÁTICO sobre diversos componentes del ciclo hidrológico en diversas regiones del país.***

Bajo los escenarios de emisiones de GEI RCP 4.5 y RCP 8.5 se estiman impactos negativos en los sistemas hídricos del país. Se proyecta una importante disminución de la precipitación, de la disponibilidad de agua, de los volúmenes medios anuales de escurrimiento, de la infiltración, y de la recarga de acuíferos. Los impactos de acuerdo con las proyecciones se vuelven más críticos debido a un aumento en la temperatura y en la evapotranspiración. En algunos casos, dependiendo de los Modelos de Circulación General (MCG) empleados, las proyecciones de precipitación muestran discrepancia, sobre todo entre un aumento o disminución estacional de esta variable.

En regiones áridas del país se estima que la disminución en precipitación puede ser entre el 17 y 22%<sup>31</sup>. No obstante, la información generada es heterogénea, y no es uniforme en la magnitud

<sup>30</sup> Ávila García, P. (2008). *Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México*. Ciencias, Núm. 90, abril-junio, 2008, pp. 46-57 Universidad Nacional Autónoma de México. Ciencias (90), 46-57.

<sup>31</sup> Herrera-Pantoja, M., & Hiscock, K. M. (2015). *Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico*. Environmental Science & Policy, 54, 81-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>

de los cambios en la precipitación. En algunos estudios se estima un aumento de precipitación de hasta 11%; incluso en escenarios futuros el aumento de precipitaciones en ciertas regiones del país y debido la naturaleza del terreno, se podrían ver afectadas por inundaciones. También se espera que a nivel nacional el cambio en los patrones de precipitación lleve a lluvias breves pero intensas que provocarán inundaciones y una erosión significativa del suelo<sup>32</sup>.

En regiones como la Zona Metropolitana de Ciudad de México, la disminución de la precipitación anual en el Sistema Cutzamala se estima hasta del 5% para el 2050. Aunque bajo ciertas condiciones de emisiones y MCG las estimaciones indican un aumento en precipitación de verano y disminución en invierno<sup>33</sup>. En el norte del país se esperan impactos negativos en el caudal de los ríos, con reducción de su escorrentía de hasta el 60% en el largo plazo<sup>34</sup>. Aunque para ciertas zonas del norte los impactos en la recarga siguen siendo muy variables, dependiendo del horizonte y los escenarios de emisiones, habrá variabilidad, con aumentos o disminuciones en temporadas secas o húmedas de las regiones en cuestión. Para el sur, en la cuenca del río Grijalva se estima una disminución de hasta el 15% de precipitación en ciertas zonas de los estados de Chiapas y Tabasco.

***Los eventos de sequía observada se han vuelto más frecuentes y severos, condición que se volverá más crítica como efecto del CC, y tendrá impactos en diversos sectores de la sociedad.***

En relación con los cambios en las condiciones meteorológicas, se ha generado lo que se denomina Monitor de Sequía<sup>35</sup>, en el que se reportan áreas anormalmente secas en el centro y occidente del país, con incremento de sequía en el noroeste y norte, mientras que en el sur y

---

<sup>32</sup> González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M., & Arriaga-Medina, J. (2015). *Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change*. In: Gebriye, S. S. & Concepcion, D. M., eds. *Sustainability of Integrated Water Resources Management*. Springer, Cham. 181-195.

<sup>33</sup> Martínez, S., Kralisch, S., Escolero, O., & Perevochtchikova, M. (2015). *Vulnerability of Mexico City's water supply sources in the context of climate change*. *Journal of Water and Climate Change* 6(3), 518-533. doi: 10.2166/wcc.2015.083

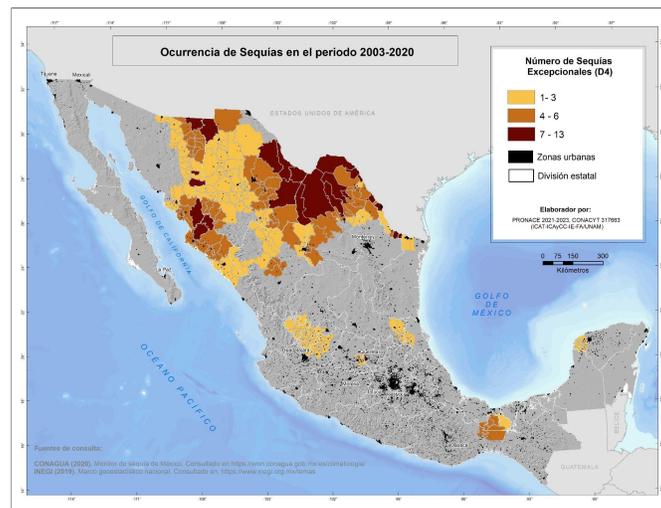
<sup>34</sup> Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A. (2016). *Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico*. *Agricultural Water Management* 175, 29-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.029>

<sup>35</sup> CONAGUA. (2016). *Categorías de sequía. Clasificación de la intensidad de sequía*. <https://smn.cna.gob.mx/es/categorias-de-sequia> (acceso 12 de octubre 2022).

sureste se reporta que se superó la sequía severa y extrema<sup>36</sup>. A través de los datos observados se han identificado períodos de sequía más severos en cuanto a la duración y frecuencia de estos. Si bien estos períodos se han observado con mayor frecuencia en la zona, la mayor parte del territorio los ha presentado en las últimas décadas.

La revisión de datos del periodo 2003-2020<sup>37</sup> permite distinguir la ocurrencia e intensidad de sequías a nivel municipal. Las Sequías Excepcionales (D4), caracterizadas por pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, con probable situación de emergencia debido a la ausencia de agua; se ha presentado principalmente en municipios de los estados de Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas; seguido de Veracruz, Tamaulipas, Oaxaca, Nuevo León, y Durango; y con menor ocurrencia en Aguascalientes, Baja California, Campeche, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Querétaro y Yucatán (véase **Figura 6**).

**Figura 6.** Ocurrencia de Sequías Excepcionales en el periodo 2003-2020



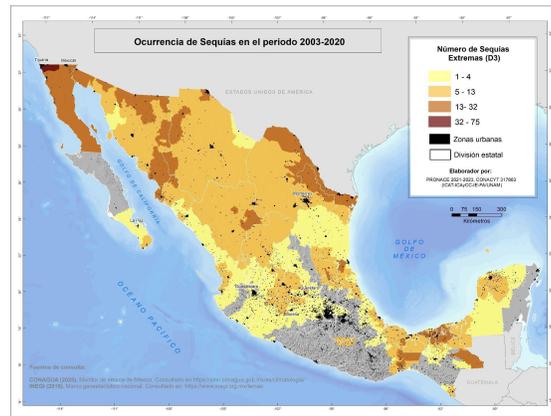
Fuente: CONAGUA (2020) Consultado en [www.sina.conagua.gob.mx/es/climatología/](http://www.sina.conagua.gob.mx/es/climatología/); INEGI (2019) Marco geoestadístico nacional. Consultado en: <https://inegi.org.mx/temas>

<sup>36</sup> CONAGUA. (2017b). *Reporte del clima en México, mayo 2017*. Año 7 No 5 Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional. <http://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%3%ADa/Diagn%3%B3stico%20Atmosf%3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%3%A9xico/RC-Mayo17.pdf> (acceso 12 octubre 2022)

<sup>37</sup> CONAGUA (2020). *Monitor de sequía de México*. Consultado en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia>

Respecto a la categoría Sequías Extremas (D3), identificadas por presentar pérdidas mayores en cultivos y pastos, con riesgo extremo de incendios forestales, y con restricciones generalizadas en el uso del agua debido a su escasez<sup>38</sup>. Con ocurrencia más generalizada a lo largo del territorio, pero acentuada por periodos largos en los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito en Baja California. En un rango menor se encuentran los municipios de Veracruz, Tabasco, Chiapas, Tamaulipas, Sonora, Sinaloa, Oaxaca, Nuevo León y Durango. En el centro del país se han presentado de 1 a 4 sequías en Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Puebla y Querétaro (véase **Figura 7**).

**Figura 7.** Ocurrencia de Sequías Extremas en el periodo 2003-2020.



Fuente: CONAGUA (2020) Consultado en [www.sina.conagua.gob.mx/es/climatología/](http://www.sina.conagua.gob.mx/es/climatología/); INEGI (2019) Marco geostadístico nacional. Consultado en: <https://inegi.org.mx/temas>

Aunque la severidad, persistencia y frecuencia de períodos hidrológicos extremos en México varían según los escenarios, la mayoría de las investigaciones apuntan hacia el aumento en duración y frecuencia de los eventos secos a muy secos. El clima futuro además de las bajas precipitaciones se combinará con altas temperaturas y mayores tasas de evapotranspiración, reflejado en la baja disponibilidad de agua superficial, baja humedad del suelo y disminución en la recarga de acuíferos. Las proyecciones indican una disminución en disponibilidad de 17% para

<sup>38</sup> *Íbidem*

el 2030<sup>39</sup>. En el sector energético, se estima una pérdida anual de hasta \$3,500 millones de pesos al 2050 por la disminución en la generación de energía de presas alimentadas por el río Grijalva<sup>40</sup>.

***Se estiman importantes impactos negativos del Cambio Climático sobre la disponibilidad de agua y por lo tanto en la producción agrícola, lo cual supone un alto riesgo para la seguridad alimentaria nacional.***

La producción agrícola se conforma por el 25% bajo esquema de riego y 75% de temporal. Con respecto al valor de la producción total a nivel nacional el 40% es aportado por la agricultura de temporal<sup>41</sup>. Los datos del REPDA<sup>42</sup> muestran que el 62% del volumen concesionado para uso agrícola fue de origen subterráneo, mientras el 38% superficial.

Períodos largos de temperatura y sequía generan estrés hídrico en las plantas, afectando los rendimientos y la producción de los cultivos. Los altos niveles de evapotranspiración hacen que se requiera una mayor cantidad de irrigación para los cultivos, condiciones que ponen en riesgo los cultivos por irrigación y los cultivos de temporal con alta dependencia a la distribución anual de las lluvias.

A nivel nacional, según los cambios observados, la sequía ha provocado crisis relevantes en la producción de maíz y frijol, donde varios eventos de sequía entre 1940-1987 afectaron todo el territorio, siendo los estados del norte los más afectados<sup>43</sup>. Baja California, como uno de los más vulnerables al CC.

---

<sup>39</sup> Martínez-Austria, P. F., Vargas Hidalgo, A., & Patiño-Gómez, C. (2019). *Dynamic modelling of the climate change impact in the Conchos River basin water management*. Tecnología y ciencias del agua, 10 (1), 207-233. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-01-08

<sup>40</sup> González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M., & Arriaga-Medina, J. (2015). *Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change*. In: Gebriye, S. S. & Concepcion, D. M., eds. Sustainability of Integrated Water Resources Management. Springer, Cham. 181-195.

<sup>41</sup> CONAGUA. (2020). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-temporal-tecnificado> (acceso 12 octubre 2022)

<sup>42</sup> CONAGUA. (2020a). *Localizador de Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales*. <https://sigaxis.conagua.gob.mx/locrepda20/>

<sup>43</sup> Magaña, V. O., & Conde, C. (2000). *Climate and freshwater resources in northern Mexico: Sonora, a case study*. Environmental monitoring and assessment 61(1), 167-185.

***La calidad del agua en la mayor parte de los ecosistemas acuáticos superficiales es mala, el incremento de temperaturas y la disminución de las precipitaciones incrementará la problemática.***

Actualmente más del 90% de la población nacional habita en regiones hidrológicas con problemas de contaminación. La contaminación de cuerpos de agua por descargas de agua residual provoca una disminución en la disponibilidad de los sistemas. La condición actual de alteración de las fuentes de agua se podría ver acrecentada debido a las altas temperaturas y a su efecto sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua. No obstante, existe muy poca investigación con respecto a los impactos del CC sobre la calidad del agua. Las investigaciones existentes indican una influencia importante de la temperatura sobre el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y del Oxígeno Disuelto (OD)<sup>44</sup>, lo cual afecta la capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua<sup>45 46</sup>.

***Aumento de presencia de algas, sargazo y eutrofización relacionadas con el aumento de temperatura.***

La presencia de algas con potencial tóxico (*i.e.* cianobacterias) presente en los sistemas de agua dulce, así como un incremento de la eutrofización (enriquecimiento por nutrientes) darán como resultado una menor disponibilidad de las fuentes de abastecimiento de agua, así como la alteración de sistemas naturales y artificiales (*i.e.* presas). El incremento en temperatura y evapotranspiración, aunado a la disminución de lluvias, propicia la eutrofización, con efectos deletéreos para la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos<sup>47</sup>.

El florecimiento de la macroalga pelágica *Sargassum* spp. en zonas costeras afectan la costa norte del Caribe Mexicano desde 2011. Son eventos regionales y locales causados por al menos tres especies de *Sargassum* que responden a varios factores como son: enriquecimiento de

---

<sup>44</sup> Montes, R. T., Navarro, I., Domínguez, R., & Jiménez, B. (2013). *Modificación de la capacidad de autodepuración del río Magdalena ante el cambio climático*. Tecnología y ciencias del agua, 4(5), 71-83.

<sup>45</sup> González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M., & Arriaga-Medina, J. 2015. *Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change*. In: Gebriye, S. S. & Concepcion, D. M., eds. Sustainability of Integrated Water Resources Management. Springer, Cham. 181-195.

<sup>46</sup> IMTA-SEMARNAT. (2011). *Impacto del cambio climático en la calidad del agua en México*.

<sup>47</sup> González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M., & Arriaga-Medina, J. (2015). *Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change*. In: Gebriye, S. S. & Concepcion, D. M., eds. Sustainability of Integrated Water Resources Management. Springer, Cham. 181-195.

nutrientes, incremento de la temperatura, cambios en los patrones climatológicos, además de causas aún desconocidas. El impacto de toneladas de sargazo tiene implicaciones en el funcionamiento ecosistémico y en la biodiversidad, así como impactos socioeconómicos en pesquerías, en actividades turísticas y con disrupción social a nivel local con efectos potenciales en la salud.

***Problemas de infraestructura -mal manejo o ineficiente gestión del recurso, falta de infraestructura- hacen más crítica la situación del CC.***

Actualmente, mucha de la infraestructura para la distribución del recurso hídrico se encuentra en mal estado, no existe modernización. Persisten deficiencias en la operación y mantenimiento de los sistemas de distribución de agua y en la infraestructura para el saneamiento. Se estima que no más de un 20% del agua residual entra en una planta de tratamiento de aguas residuales, con efectos ambientales en la emisión de gases de efectos invernadero (GEI)<sup>48</sup>.

La vulnerabilidad de la infraestructura es alta debido al mal estado, con una disminución en capacidad y exposición a daños por parte de terceros; ante los efectos del CC, esta vulnerabilidad en la infraestructura se verá acrecentada.

La disminución en precipitaciones provocará una baja en la disponibilidad de agua de las fuentes superficiales, además de afectar la recarga de los acuíferos que alimentan a los sistemas de distribución. Además, la alta impermeabilidad en las grandes urbes agrava los efectos hidrológicos, ya que hay una mayor escorrentía, seguida de una reducción de recarga de agua, y un incremento en la degradación de la misma, aunado a altas temperaturas y eventos de olas de calor que aumentarán la demanda de agua, lo que propiciará conflictos sociales a nivel regional, nacional y transfronterizos<sup>49</sup>.

## **Identificación de vacíos de información**

---

<sup>48</sup> Noyola, A., Morgan-Sagastume, J.M., Güereca, P. (2013). *Selección de Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Instituto de Ingeniería, UNAM-IDRC, Canadá.

<sup>49</sup> Martínez-Austria, P. F., Vargas Hidalgo, A., & Patiño-Gómez, C. (2019). *Dynamic modelling of the climate change impact in the Conchos River basin water management*. *Tecnología y ciencias del agua*, 10 (1), 207-233. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-01-08

- Es necesario ampliar estudios relacionados con disponibilidad y calidad de agua subterránea en contexto de CC sobre los cuales la información es muy restringida.
- Es necesario dar seguimiento al monitoreo de las condiciones meteorológicas y de caudales en el territorio nacional, con el fin de entender y pronosticar los fenómenos meteorológicos extremos.
- Se requiere dar seguimiento al sistema de monitoreo de calidad de agua tanto superficial como subterránea a lo largo del territorio, actualmente hay zonas sin datos o con datos tomados de manera aleatoria, con información poco sistematizada.
- Establecer parámetros específicos de registro de calidad de agua superficial y subterránea que se deban medir a largo plazo e informar de manera certera las condiciones a la población.
- Estudios de los impactos potenciales del CC en el caudal ecológico en ecosistemas, así como puntualizar cuáles son las especies acuáticas que pudieran funcionar como indicadoras de CC.
- El campo de la investigación entre recursos hídricos, CC y agricultura es reciente y por lo tanto, reducido; la información existente se obtiene indirectamente ligando la disponibilidad, demanda y sobreexplotación de acuíferos con efectos en el sector agrícola; hacen falta estudios que aborden de manera más directa este tópico.
- La alteración de la calidad de agua en fuentes de abastecimiento de agua está poco documentada especialmente para compuestos orgánicos (*i.e.* volátiles) y contaminantes emergentes (*i.e.* fármacos, microplásticos) de los cuales se desconoce su comportamiento bajo condiciones de modificación del clima.
- Es imperativa la aplicación de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas residuales para disminuir la contribución en la producción de GEI por aguas residuales, lo que debe visualizarse como una oportunidad en la cual es necesaria una inversión.

## **Perspectivas**

En México estamos explotando los sistemas de agua superficial y subterránea de manera acelerada, influyendo en las interconexiones entre ellos, alterando los procesos asociados con el

ciclo del agua, en especial en zonas agrícolas, urbanas e industriales, que aunado a los efectos del Cambio Climático, está llevando a una seria crisis ambiental, a la cual será difícil adaptarse, dado que se prevé una modificación en los patrones de temperatura y precipitación de manera heterogénea. Es necesario conservar áreas con vegetación natural que propicien los procesos que permiten se lleve a cabo el ciclo hidrológico.

Se cuenta con soluciones tecnológicas que pueden ayudar al manejo del agua en esta crisis, aplicando desde ecotecnias *i.e.* sistemas de captación de agua de lluvia, cortinas de niebla, hasta sistemas de tratamiento de agua para desalinización, tratamiento de aguas residuales, que permitan el reúso seguro de este recurso, pero esto implica inversión en infraestructura, misma que no se está haciendo.

Es necesario hacer extensivo este entendimiento de los problemas asociados con este recurso que es finito, que es común a los habitantes de este país y lo hemos transformado en un recurso no renovable por la tasa de uso a la que lo estamos sometiendo. Es necesario socializar esta problemática con tomadores de decisiones, con la industria, con productores agropecuarios, y con la población en general. Es inminente la necesidad de tratamiento y reúso de agua dado que somos más habitantes que requerimos cada vez más de este elemento vital para nuestra vida diaria y bienestar, para la generación de alimentos, así como para el desarrollo económico del país.