



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

Campo de conocimiento: Vulnerabilidad y respuesta al cambio global

VULNERABILIDAD HÍDRICA ANTE LA GLOBALIZACIÓN ECONÓMICA Y EL  
CAMBIO CLIMÁTICO: EL CASO DE LA CUENCA DE LA INDEPENDENCIA EN  
GUANAJUATO.

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

IVÁN SAADIHT SÁNCHEZ BARRERA

COTUTORES PRINCIPALES:

DRA. PATRICIA ÁVILA GARCÍA

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad

DR. CARLOS GAY GARCÍA

Programa de Investigación en Cambio Climático, Centro de Ciencias de la Atmósfera

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DRA. ANDREA MARTÍNEZ BALLESTÉ

Instituto de Biología

DR. FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, abril de 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Coordinación de Estudios de Posgrado  
Ciencias de la Sostenibilidad  
Oficio: CEP/PCS/055/20  
Asunto: Asignación de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence  
Directora General de Administración Escolar  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Presente

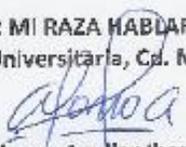
Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su quincuagésimo segunda sesión del 12 de noviembre de 2019, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, del alumno **Sánchez Barrera Ivan Saadiht** con número de cuenta **516017387** con la tesis titulada "Vulnerabilidad hídrica ante la globalización económica y el cambio climático: el caso de la cuenca de la Independencia en Guanajuato", bajo la dirección de la Dra. Patricia Ávila García y del Dr. Carlos Gay García.

PRESIDENTE: DRA. ADRIANA SANDOVAL MORENO  
VOCAL: DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ  
SECRETARIO: DRA. ANDREA MARTÍNEZ BALLESTÉ  
VOCAL: DR. CARLOS GAY GARCÍA  
VOCAL: DRA. PATRICIA ÁVILA GARCÍA

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 12 de febrero de 2020.

  
Dr. Alonso Aguilar Ibarra  
Coordinador  
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

*La tecnociencia no puede realizar  
transformaciones milagrosas, del mismo  
modo que no pueden hacerlo las leyes del mercado.*

*Las únicas leyes verdaderamente férreas con  
las cuales nuestra cultura finalmente tendrá  
que ajustar cuentas, son las leyes de la naturaleza.*

*Enzo Tiezzi*

## **Agradecimientos**

A la UNAM y a quienes conforman el posgrado en ciencias de la sostenibilidad.

Al programa de becas UNAM por la beca otorgada durante el primer semestre de los estudios de posgrado.

Al Conacyt por la beca otorgada para la conclusión de los estudios de posgrado.

A la coordinación del posgrado por su amable atención para todos los trámites requeridos.

A mi codirectora Dra. Patricia Ávila García por su compromiso, orientación académica y su paciente contribución en mi formación profesional.

A mi codirector Dr. Carlos Gay García por su dedicación, apoyo académico, ejemplo e inspiración sobre el quehacer científico y la relevancia que tiene el conocimiento.

A la Dra. Andrea Martínez por su disponibilidad y aportaciones al desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Fermín Pascual por sus valiosas observaciones y atención académica.

A la Dra. Ana Cecilia Conde por la amable lectura de este trabajo.

A la Dra. Adriana Sandoval por la revisión de este escrito.

A mis compañeros de posgrado por su ejemplo de tenacidad, compromiso y trabajo por el bienestar socioambiental, grata compañía y diálogo.

## Índice

1	Introducción .....	1
2	Problema de estudio .....	8
2.1	Preguntas de investigación.....	10
2.2	Hipótesis.....	11
2.3	Objetivos .....	11
2.3.1	Objetivo general.....	11
2.3.2	Objetivos particulares .....	11
3	Marco teórico y conceptual .....	12
3.1	Agua y cambio global .....	12
3.1.1	Cambio climático y recursos hídricos.....	15
3.1.2	Globalización económica y agricultura de riego .....	25
3.1.3	Vulnerabilidad hídrica .....	37
4	Área de estudio: el agua como factor crítico en la cuenca de la Independencia.....	48
5	Marco metodológico .....	58
5.1	Construcción del sistema complejo.....	59
5.1.1	Límites. ....	61
5.1.2	Elementos.....	62
5.1.3	Estructura. ....	63
5.1.4	Niveles de procesos. ....	64
5.2	Métodos aplicados.....	65
5.2.1	Revisión bibliográfica y recorrido general en campo.....	65
5.2.2	Cálculo de parámetros del balance hídrico en condiciones normales.....	66

5.2.3	Cálculo de los parámetros del balance de agua en condiciones de cambio climático.	68
5.2.4	Cálculo del volumen de escurrimiento natural y disponibilidad media de agua superficial.	69
5.2.5	Vulnerabilidad hídrica y cambio climático.	72
5.2.5.1	Grado de Exposición.	73
5.2.5.2	Grado de sensibilidad.	73
5.2.5.3	Capacidad de adaptación.	74
6	Análisis de resultados.	77
6.1	El sistema complejo	77
6.1.1	Subsistema hidrológico.	77
6.1.2	Subsistema agroproductivo.	83
6.1.3	Subsistema sociopolítico.	92
6.1.4	Interrelaciones causales entre subsistemas y dinámica del sistema.	104
6.2	Balance y vulnerabilidad hídricos ante escenarios de cambio climático	110
6.2.1	Parámetros del balance hídrico en condiciones actuales y ante escenarios de cambio climático	110
6.2.2	Balance hídrico en condiciones actuales y de cambio climático	121
6.2.3	Escurrimiento natural actual y proyección futura ante escenarios de cambio climático	125
6.2.4	Disponibilidad-déficit de agua superficial actual y bajo escenarios de cambio climático	128
6.2.5	Vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático	130
7	Conclusiones	134
8	Bibliografía.	162

## Índice de figuras

Figura 1. Contribuciones al cambio observado en la temperatura de la superficie 1951-2010 (IPCC, 2014).....	17
Figura 2. Emisiones antropógenas de CO <sub>2</sub> anuales y calentamiento frente a emisiones de CO <sub>2</sub> acumuladas (IPCC, 2014).....	19
Figura 3. Cambios en la temperatura media en superficie y precipitación media (Stocker et al., 2013).....	21
Figura 4. Zonas de escasez física y económica de agua (IIMA, 2007). ....	38
Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio. ....	48
Figura 6. Componentes de sensibilidad hídrica (IMTA, 2016). ....	55
Figura 7. Nivel de vulnerabilidad hídrica global ante el cambio climático para el área de estudio (IMTA, 2016).....	56
Figura 8. Acuíferos con publicación de disponibilidad en el DOF para el año 2013 (CONAGUA, 2014). ....	57
Figura 9. Cuencas hidrológicas con publicación de disponibilidad en el DOF, 2015(CONAGUA, 2016). ....	57
Figura 10. Variación de los aportes del río Laja a la presa Ignacio Allende (Palacios y López, 2004).....	78
Figura 11. Mapa de usos de agua de acuerdo con el sector. Elaboración propia, datos CONAGUA (2013). Totales en millones de m <sup>3</sup> (Mm <sup>3</sup> ). ....	80
Figura 12. Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de brócoli (2003-2017). ....	88
Figura 13. Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de lechuga (2003-2017). ....	89
Figura 14.. Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de espárrago (2003-2017).....	90
Figura 15. Volúmenes rescatados esperados, de acuerdo con las líneas estratégicas del PEHG (Datos PEHG, 2015). ....	100
Figura 16. Esquema del sistema complejo, sus subsistemas más relevantes e interacciones. ....	107

Figura 17. Esquema de la dinámica del sistema complejo. ....	108
Figura 19. Temperatura mínima, máxima y media, línea base. ....	111
Figura 20. Precipitación y evapotranspiración línea base. ....	112
Figura 21. Mapa de la distribución de la temperatura media anual. ....	113
Figura 22. Mapa de distribución de temperatura modelo GFDL-CM3 año 2040 RCP 4.5. .....	114
Figura 23. Mapa de distribución de temperatura modelo MPI-ESM-LR año 2070 RCP 8.5. .....	115
Figura 24. Mapa de distribución de precipitación acumulada anual. ....	116
Figura 25. Mapa de distribución de precipitación modelo GFDL-CM3 año 2040 RCP 4.5. .....	118
Figura 26. Mapa de distribución de precipitación modelo MPI-ESM-LR año 2070 RCP 8.5. ....	118
Figura 27. Comparación de temperaturas medias, línea base y escenarios futuros. ....	119
Figura 28. Comparación de precipitación, línea base y escenarios de cambio climático. .....	120
Figura 29. Evapotranspiración de referencia, línea base y escenarios de cambio climático. .....	120
Figura 30. Balance hídrico climatología de referencia. ....	121
Figura 31. Balance hídrico, modelo GFDL CM3 RCP 4.5 año 2040. ....	122
Figura 32. Balance hídrico modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070. ....	123
Figura 33. Mapa de los escurrimientos naturales de agua (Mm <sup>3</sup> ) en la cuenca de la Independencia. ....	126
Figura 34. Mapa del volumen de escurrimiento natural (Mm <sup>3</sup> ), modelo GFDL- CM3 RCP 4.5 año 2040. ....	126
Figura 35. Mapa del volumen de escurrimiento natural (Mm <sup>3</sup> ), modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070. ....	127
Figura 36. Mapa de disponibilidad hídrica media anual (Mm <sup>3</sup> ). ....	128
Figura 37. Mapa de disponibilidad-déficit hídrico anual (Mm <sup>3</sup> ) modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040. ....	129

Figura 38. Mapa de disponibilidad-déficit hídrico anual (Mm <sup>3</sup> ) modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.....	129
Figura 39. Mapa índice de vulnerabilidad hídrica por localidad. ....	131
Figura 40. Mapa de vulnerabilidad hídrica modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040... ..	131
Figura 41. Mapa índice de vulnerabilidad hídrica modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070. ....	132

### **Índice de tablas**

Tabla 1. Conceptos referentes a cambio climático concernientes a este trabajo. ....	24
Tabla 2. Valores factor K.....	70
Tabla 3. Componentes del índice de vulnerabilidad global (modificado de González, Haces y Rangel, 2011).....	76
Tabla 4. Número de hectáreas sembradas y el valor de la producción por tipo de cultivo (2003-2017). ....	90
Tabla 5. Totales de hectáreas sembradas y total del valor de producción (2003-2017)..	91
Tabla 6. Financiamiento estatal a los COTAS (modificado de CEAG, 2006). ....	98
Tabla 7. Valores de referencia mensuales. ....	111
Tabla 8. Escenario climático futuro modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040 (valores promedio mensuales).....	114
Tabla 9. Escenario climático futuro modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070. ....	116
Tabla 10. Balance hídrico, línea base. ....	121
Tabla 11. Balance hídrico modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040.....	122
Tabla 12. Balance hídrico escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.....	123
Tabla 13. Cambio esperado en el balance hídrico. ....	124

## 1 Introducción

Satisfacer las necesidades humanas fundamentales mientras se preservan los sistemas de soporte vital del planeta Tierra (Kates *et al.*, 2001) es una idea que ha surgido en las últimas décadas como respuesta a la crisis ambiental global, la cual nace de una perspectiva científica interesada en la relación entre los sistemas naturales y humanos. Las ciencias de la sostenibilidad, como campo emergente, busca entender el carácter fundamental de los vínculos entre sistemas globales naturales y humanos (Komiyama y Takeuchi, 2006), así como la comprensión de las interacciones de los procesos globales con las propiedades socioambientales de sitios y sectores particulares.

La crisis global de sostenibilidad es causada por múltiples factores y su complejidad, por lo cual, no es tarea fácil obtener una visión completa de los problemas socioambientales y sus posibles vías de resolución (Komiyama y Takeuchi, 2006). Por ello, las ciencias de la sostenibilidad, investigan las interacciones entre los sistemas globales y humanos, los mecanismos complejos que conducen a la degradación de estos sistemas y los riesgos concomitantes para el bienestar humano; tratan sobre las interacciones entre sistemas globales y locales, y con cómo estas interacciones dinámicas afectan la satisfacción de las necesidades intergeneracionales, la reducción de la pobreza y la conservación de los sistemas de soporte de vida del planeta (Clark, y Dickson, 2003; Kates, 2012).

El pluralismo metodológico es una característica de las ciencias de la sostenibilidad, ya que proporciona análisis integrados que son reflexivos, como resultado de procesos iterativos que vinculan el conocimiento y las acciones humanas con respecto a la complejidad y cuestiones tecnológicas (Spangerber, 2011). Es interdisciplinaria, ya que combina, interpreta

y comunica conocimientos de diversas disciplinas científicas y no científicas, con la finalidad de integrar enfoques que pueden ser interpretados como no compatibles.

La investigación sobre el cambio ambiental global ha mejorado nuestra comprensión sobre la estructura y función de la biosfera con respecto a las actividades humanas. La emergencia de las ciencias de la sostenibilidad constituye parte del entendimiento de la condición dual humano-ambiental con el objetivo de satisfacer las necesidades de la sociedad y al mismo tiempo mantener los sistemas de soporte vital del planeta. Estos objetivos requieren mayor entendimiento sobre la vulnerabilidad, debido a que la vulnerabilidad no sólo se presenta por exposición a perturbaciones y tensiones, sino que depende de la sensibilidad y las capacidades adaptativas del sistema. Este reconocimiento amplía el diseño de las evaluaciones de vulnerabilidad, para incluir la capacidad de tratar los sistemas humano-ambientales como acoplados y complejos, así como tomar en cuenta los vínculos dentro y fuera de los sistemas que influyen en la vulnerabilidad de la unidad de estudio (Turner *et al.*, 2003).

La vulnerabilidad, como elemento de investigación, dirige la atención a preguntas, como: ¿Quiénes y qué son vulnerables a los múltiples factores ambientales y a los cambios humanos en curso, y dónde? ¿Cómo estos cambios son amplificadas por las diferentes condiciones humanas y ambientales? ¿Cómo se puede formular la teoría y el uso de modelos para explicar las variaciones en las interacciones humano-ambiente? ¿Cuáles pueden ser las principales compensaciones entre bienestar humano y el entorno natural? ¿Qué se puede hacer para reducir la vulnerabilidad? (Kates, 2011; Turner *et al.*, 2003).

Gran parte del conocimiento para promover la sostenibilidad tendría que ser regional y basado en el lugar, y centrado en escalas intermedias donde los múltiples factores estresantes se interactúan para degradar los sistemas humano-ambientales (Kates, 2012). En escalas intermedias la complejidad de los sistemas acoplados es más fácilmente comprensible, debido a que la implementación tecnológica y la gestión de recursos es identificable junto a sus interrelaciones generales con los distintos aspectos del sistema en estudio.

El carácter local de gran parte de lo que la ciencia de la sostenibilidad está tratando de explicar significa que la investigación tendrá que integrar la comprensión de los procesos clave en toda la gama de escalas y las influencias recíprocas entre ellas; la transescalaridad, es decir: cómo se relaciona lo global con lo local, cómo puede el conocimiento de los componentes explicar las propiedades generales del sistema, para comprender la sostenibilidad como un proceso dinámico que se construye de forma continua (Casas *et al.*, 2017; Kates, 2012). También toma en cuenta los avances en nuestra capacidad para abordar temas como el comportamiento de los sistemas complejos, sus respuestas, las múltiples tensiones y procesos que interactúan y que son mutuamente influyentes; (Casas *et al.*, 2017; Kates *et al.*, 2001).

La vulnerabilidad y disponibilidad del agua se ha vuelto un reto crítico de los últimos años. Los recursos hídricos reciben estrés por los cambios en políticas e intensificación de uso como resultado de la globalización económica; así como por el cambio climático, el cual afecta la cantidad y distribución del agua. El cambio climático y la globalización económica modifican la disponibilidad y acceso al agua, sin embargo, los efectos de estos cambios no están distribuidos de manera homogénea.

Algunos sectores presentan la globalización económica como el único detonante de bienestar; se propone como un proceso altamente eficaz basado en diversos aspectos (Paz, 2005): 1) el conocimiento y la información como motor de la productividad, 2) aceleración de los procesos productivos como estrategia empresarial, 3) la innovación y transferencia tecnológica como parte del valor agregado en los productos y servicios, 4) fomento al crecimiento y competencia económicos y 5) intensificación de las relaciones internacionales. Estas propuestas han hallado un nicho específico, principalmente desde posiciones políticas, que las promueven como la única forma de satisfacción de las necesidades humanas básicas.

El uso del agua subterránea se ha extendido en muchas zonas y ha crecido exponencialmente en escala e intensidad en las últimas décadas. A escala global la extracción de agua subterránea creció de un nivel base de 150 kilómetros cúbicos en 1950, a 982 kilómetros cúbicos para el año 2010 (Shah, 2007; Margat y J. van der Gun, 2013). La mayor parte de este crecimiento se concentra en la agricultura. Mientras que el crecimiento económico aumentó en las áreas irrigadas desde 1970, también las áreas irrigadas total o parcialmente por agua subterránea reportaron un aumento de 69 millones de hectáreas a 100 millones de hectáreas en el año 2000 (Shah, 2007).

Los estudios hidrológicos recientes han cuantificado tasas alarmantes de agotamiento de las aguas subterráneas en todo el mundo. Este agotamiento se debe principalmente a las extracciones de agua para el riego y producción de alimentos que forman parte del consumo global de alimentos. La agricultura utiliza hasta el 80% del agua dulce del planeta, de este porcentaje, aproximadamente el 11% de las aguas subterráneas no renovables están integradas al comercio internacional de alimentos (Dalin, Wada, Kastner y Puma, 2017).

La importancia del agua es indudable, muchos sectores y sistemas dependen de la disponibilidad de los recursos hídrico, los cambios en los regímenes hidrológicos debido al cambio climático tendrán impactos socioeconómicos y ambientales significativos (Kundzewicz *et al.*, 2008). A pesar de su relevancia, el agua sigue estando comprometida por una multiplicidad de estresores, entre ellos el cambio climático y los procesos derivados de la globalización económica, con sus respectivos impactos locales. La distribución y disponibilidad de agua dulce, precipitación y escorrentía, será errática, con alta diferenciación con respecto a las áreas del planeta que recibirán cantidades diferenciadas de agua. Las variaciones climáticas exacerbarán la vulnerabilidad hídrica en conjunto con los distintos estresores del agua, como la intensificación productiva, contaminación, cambios en el uso de suelo, entre otros tipos de degradación ambiental.

Para México se proyecta que en la mayor parte de zonas áridas y semi-áridas los suministros de agua sufrirán de mayor estrés por cambio climático, resultando en una menor disponibilidad de agua, mientras que la capacidad de los sistemas hídricos para cubrir la demanda de los usos del agua se verá disminuida y la vulnerabilidad a condiciones adversas se intensificará (Romero-Lankao *et al.*, 2014).

Con base en lo planteado anteriormente, el presente trabajo incorpora las nociones de complejidad, en el sentido de subsistemas interdefinidos (García, 2006), lo cual tuvo como fin la construcción de un sistema general para incorporar los principales subsistemas involucrados en la vulnerabilidad hídrica, bajo la exposición de cambio climático antropogénico y globalización económica. La caracterización de este sistema permitió identificar los principales componentes que promueven la vulnerabilidad hídrica en la zona,

cómo se relacionan entre sí y los elementos principales que han promovido el aumento de vulnerabilidad hídrica.

En una segunda fase, se realizó un análisis de las variaciones climáticas dentro de escenarios a mediano plazo, para conocer el comportamiento del balance hídrico bajo condiciones de cambio climático. Con estos datos fue posible iniciar una tercera etapa que consistió en la evaluación de vulnerabilidad, mediante un índice global de vulnerabilidad hídrica, el cual está compuesto por siete índices, que fueron normalizados y ponderados mediante un proceso de jerarquización analítica (AHP), los resultados fueron mapeados para conocer la distribución espacial de la vulnerabilidad, así también, para relacionar los usos del agua por parte de los cultivos de exportación, así como las variaciones climáticas.

Se eligió como estudio de caso la cuenca hidrológica de la Independencia en el estado de Guanajuato. Un sistema que presenta alteraciones por la globalización económica, donde se ha implementado un modelo productivo agroexportador intensivo, que ha generado escasez hídrica y acceso desigual al agua. Se encuentra en una zona semiárida del país considerada sensible a los efectos del cambio climático, por aumento de temperatura y disminución de la precipitación.

El modelo agroproductivo de exportación asociado al cambio climático antropogénico ha tenido distintos efectos en cada uno de los subsistemas propuestos (agroproductivo, sociopolítico e hidrológico), incluyendo su reconfiguración y la del sistema en su totalidad, lo que acentúa la vulnerabilidad hídrica, así como una manifestación espacial de forma diferenciada, que es dependiente de la escala de análisis. Si sumamos las alteraciones de los elementos climáticos (disminución de precipitación y aumento de temperatura), al uso del

agua del modelo agroexportador, tendremos como resultado un mayor agotamiento de los recursos hídricos. Con el consiguiente cambio en los subsistemas asociados al uso y generación del agua, así como un aumento en la vulnerabilidad hídrica.

En cuanto a los beneficiados por estos procesos, encontramos un sesgo histórico a favor de los productores involucrados directamente a las cadenas internacionales de producción. Mientras que los grupos sociales desfavorecidos se encuentran en las zonas rurales, que tienen menor acceso al agua y que ya padecen las consecuencias (enfermedades, estrés hídrico, baja calidad del agua, etc.). La condición hídrica general de la cuenca tiene un balance hídrico negativo, el cual se verá exacerbado por los efectos del cambio climático y el aumento de los volúmenes de extracción de agua subterránea.

Se realizó una exploración de las restricciones y posibilidades de implementar medidas que procuren la disminución de la vulnerabilidad hídrica. Estas mostraron un efecto positivo en la disminución del índice de vulnerabilidad hídrica en las localidades donde fueron implementadas acciones ambientales. Es decir, la urgencia de solventar la problemática del abastecimiento del aún puede ser resuelta si tomamos en consideración un ajuste en la gobernanza del agua en conjunto con otras medidas ambientales, restauración ecológica, un enfoque de adaptación basada en la naturaleza y un enfoque de transformativo.

## **2 Problema de estudio**

La escasez, acceso y disponibilidad de agua son retos críticos emergentes de este siglo. Pues los recursos hídricos están afectados por cambios en políticas y prácticas de uso como resultado de la globalización económica. El cambio climático también está afectando la cantidad, calidad y distribución del agua. A pesar de que el cambio climático y la globalización económica modifican la disponibilidad y acceso al agua, los efectos de estos cambios no son igualmente distribuidos (O'Brien y Leichenko, 2008). Las distintas regiones, sectores o grupos sociales son propensos a volverse más vulnerables debido a las consecuencias en los cambios en los patrones de precipitación, temperatura y a las afectaciones por la intensificación de los modelos de producción impuestos por la globalización económica. Cada una de estas exposiciones globales tiene consecuencias en la satisfacción de las necesidades humanas primordiales, como es el derecho humano al agua.

La globalización económica, referida como un conjunto de procesos de producción y consumo que van de una escala regional a una escala global, se manifiesta por el intrincado número de cambios interrelacionados (O'Brien, 2000). En este contexto se enmarca el modelo productivo agroexportador, que requiere un alto número de relaciones internacionales y trascendencia de escalas geográficas; además, requiere alta demanda de recursos y genera efectos socioambientales potencialmente adversos.

Aunque impera la idea de la globalización como un fenómeno de unificación de procesos, que promueve la eficiencia; existen argumentos sobre la desigualdad que genera debido a las diferencias regionales y la disparidad de los tratados internacionales entre las distintas regiones económicas (Mittelman, 1994), la sobreexplotación de recursos, disparidad de

salarios, entre otros. Así, se genera un contexto de doble exposición, es decir, los efectos del cambio climático y los posibles impactos de desigualdad generados por la globalización, haciendo que se promueva un esquema de ganadores y perdedores (O'Brian, 2000) que acentúa la vulnerabilidad hacia ciertos grupos humanos específicos.

La idea de ganadores y perdedores ha sido referida varias veces en discusiones sobre globalización; es decir, existen los beneficiados por los procesos de globalización, mientras que los perdedores sólo experimentan las consecuencias, generalmente adversas. Existen grupos particularmente sensibles a la distribución inequitativa y a los impactos negativos de la integración económica global. Delinear las conexiones entre la globalización económica y el cambio climático a diferentes escalas, se convierte en un reto a enfrentar para los análisis de vulnerabilidad socioambiental y su eventual intervención.

Es necesario entender la dinámica e interrelaciones entre los distintos subsistemas que conforman el sistema total de usos, distribución y reproducción del agua, que puedan conducir a medidas de adaptación óptimas para las distintas regiones o localidades que estén siendo afectadas por los procesos de cambio global. Los efectos de dos procesos globales pueden tener consecuencias inesperadas para sistemas socioambientales con alto grado de degradación acumulada. Las consecuencias incluyen la reconfiguración de alguno de los componentes del sistema o un cambio drástico de estructura (García, 1998).

Se eligió la cuenca de la Independencia, como estudio de caso, debido a que es un sistema alterado por la globalización económica, por un proceso productivo agroexportador, que ha generado escasez y acceso desigual al agua. Además, es sensible a los efectos del cambio climático por aumento de temperatura y disminución de la precipitación. El modelo

productivo de agricultura de exportación asociado al cambio climático antropogénico puede tener serias afectaciones, incluyendo la reconfiguración de los distintos subsistemas y el sistema total. También podrían acentuar la vulnerabilidad hídrica, así como manifestarse geográficamente de forma diferenciada.

Las presiones provenientes de la globalización económica expresadas en el alto consumo de agua por el modelo agroexportador han derivado en distintos efectos adversos para la cuenca en general, así como para ciertos grupos de la población. Es importante dilucidar los efectos socioambientales que la agricultura de exportación ha provocado a la cuenca, ya que estas actividades pueden forzar a este sistema a adoptar un comportamiento nuevo que podría incluir el colapso (Holling y Gunderson, 2002) o el aumento de vulnerabilidad; si sumamos las alteraciones de los elementos del cambio climático (disminución de precipitación y aumento de temperatura) al uso del agua del modelo agroexportador, las condiciones de los recursos hídricos para esta cuenca se verían disminuidos, además de generar cambios estructurales en otros subsistemas asociados al uso del agua.

## **2.1 Preguntas de investigación**

¿La globalización económica y el cambio climático inciden de manera diferenciada en la vulnerabilidad hídrica poblacional?

¿Quiénes son los ganadores y los perdedores en un contexto de doble exposición global, cambio climático y globalización económica?

## **2.2 Hipótesis**

Las interconexiones de la globalización económica y el cambio climático tienen un efecto sinérgico negativo que incide en el aumento de la vulnerabilidad hídrica, la cual se manifiesta de forma diferencial en una misma escala de exposición. Los ganadores son los beneficiarios directos de las redes de comercio internacional; mientras que los perdedores son las localidades afectadas por la escasez hídrica, así como modificación de los procesos y componentes del sistema hídrico.

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general**

Evaluar la vulnerabilidad hídrica en la cuenca de la Independencia ante el cambio climático y el modelo productivo agroexportador.

### **2.3.2 Objetivos particulares**

Particular 1: Describir y caracterizar un sistema complejo asociado a la vulnerabilidad hídrica en la cuenca de la Independencia.

Particular 2: Caracterizar de dos exposiciones globales, la globalización económica y el cambio climático en una cuenca.

Particular 3: Calcular un índice de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático y el uso de agua por la globalización de los procesos agrícolas.

### 3 Marco teórico y conceptual

#### 3.1 Agua y cambio global

El cambio global se refiere a los efectos antropogénicos sobre la Tierra y sus efectos en los distintos sistemas socioambientales. El Panel de Ecosistemas (PE, 2000) lo describe como: “las interacciones entre los cambios naturales en la estructura física y biológica de la Tierra y los efectos más amplios de la actividad humana”. El cambio global también hace referencia a los cambios socioeconómicos que alteran el funcionamiento de la Tierra a escala global y al cambio en las relaciones humano-ambiente que han ocurrido en los últimos siglos (Steffen, Crutzen y McNeill, 2007).

El cambio global abarca modificaciones de varios fenómenos a escala global: la economía, incluida su magnitud y distribución; el uso de recursos para la producción de energía; transporte y comunicación; uso y cubierta del suelo; urbanización; globalización; la composición atmosférica; los ciclos biogeoquímicos; el clima y los cambios de sus elementos; ciclo hidrológico (Steffen *et al.*, 2004); la pérdida acelerada de cobertura forestal; la contaminación de los cuerpos de agua por sustancias tóxicas, metales pesados y materiales de lenta degradación, entre otros (Casas *et al.*, 2017).

Contribuyen de manera importante, la conversión de paisajes naturales a paisajes agrícolas y urbanos, cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, la extinción e introducción de especies; cambios en el ciclo hidrológico por diversos usos sectoriales del agua, alteraciones estructurales de los ríos y cuencas hidrográficas circundantes (PE, 2000), entre otros procesos.

En el aspecto humano, el cambio global se expresa en la concentración acelerada de poder político y económico, migración desde las áreas rurales a los centros urbanos y del sur al norte globales (Casas *et al.*, 2017); conflictos territoriales y socioambientales por minería, derrames de petróleo, pérdida de patrimonio biocultural (Toledo, 2014), crecimiento de la pobreza, aumento de la desigualdad y de la brecha económica (OXFAM, 2012). Destacan también los cambios en la frecuencia de enfermedades humanas infecciosas, así como otros factores de cambio que representen una amenaza significativa para la salud, el bienestar humano y de otros miembros de la biota, además de comprender los aspectos biofísicos y socioeconómicos que afectan los cambios globales, sus consecuencias y manifestaciones (PE, 2000; Stern, 2006).

El daño a la Tierra ha aumentado de manera acelerada en las últimas décadas, a partir del impulso y consolidación de los modelos de desarrollo que surgieron a mediados del siglo XX (Casas *et al.*, 2017). Estos incluyen la globalización económica neoliberal, la obsesión por el crecimiento económico, la intensificación tecnológica de la agricultura y el consumismo de bienes inútiles como base de la activación económica (Martínez-Alier, 2015). Existen procesos productivos, como los modelos de agricultura intensiva, que tienen una alta capacidad destructiva de sistemas socioambientales y elementos bioculturales que han sido moldeados durante siglos. Esta apuesta por el crecimiento económico y la modernización a ultranza ha tenido altos impactos socioambientales en las últimas décadas.

Las interconexiones y relaciones entre los diversos impulsores de cambio también son parte del cambio global y pueden ser tan importantes como los cambios individuales en sí mismos (Steffen *et al.*, 2004). Además, muchos de los cambios no ocurren de forma lineal, muestran comportamientos no lineales que se manifiestan de forma diferenciada en los

distintos lugares, que conducen a efectos específicos resultantes de la mezcla de cambios interactuantes a distintas escalas. (Steffen *et al.*, 2004). La interacción de cambios de los sistemas biofísicos entre sí y entre los sistemas socioambientales, amplifican o atenúan sus efectos; este rasgo del cambio global dificulta su análisis y evaluación (Duarte *et al.*, 2006). Los efectos antropogénicos tienen mayores efectos en conjunto que por separado, esto se debe a que los cambios están interconectados y sus interacciones crean una exacerbación de sus efectos, lo que se denomina un efecto sinérgico (CCGSS, 2017). Este efecto conjunto o en sinergia es una presión mayor que se manifiesta de forma diferenciada, incluso en una misma escala y en los distintos subsistemas.

Existe amplia evidencia de que las actividades de algunos sectores y grupos de la sociedad han acelerado el ritmo de muchos procesos que antes eran naturales y han introducido numerosos impulsores de cambio; éstas dos características actúan en conjunto para alterar, perjudicar o eliminar muchos de los recursos naturales en los que se basan las sociedades humanas (PE, 2000). Así, se vuelve indispensable entender los tipos y magnitudes del cambio causado por el hombre para modificar el curso y poder moderar los efectos desfavorables (MEA, 2007).

El cambio global ocurre en todas las escalas y en cambios que tienen efectos globales acumulativos, incluso si la escala de operación es local, entendiendo esta escala por debajo del área de un estado de los EE. UU. de tamaño medio, por ejemplo, Maine (PE, 2000).

### 3.1.1 **Cambio climático y recursos hídricos**

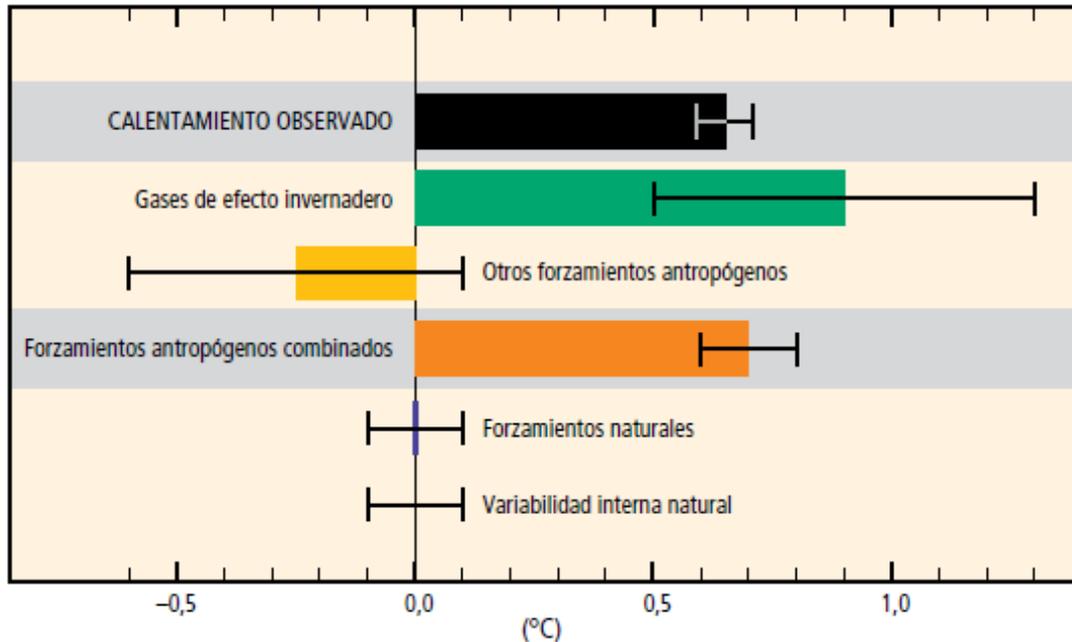
La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales, mientras que el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) también toma en cuenta las variaciones climáticas (IPCC, 2014). La causa antropogénica con mayor impacto en la atmósfera son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que tienen su origen en las fuentes industriales, de transporte, ganadería, agricultura y energía. La mayor parte del calentamiento global observado durante el siglo XX se debe muy probablemente (90% de confianza) al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero causado por las sociedades humanas (IPCC, 2007).

Para el último reporte del IPCC (2014) quedan claros los efectos humanos en el sistema climático terrestre:

“Las emisiones antropógenas de GEI han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida resultado del crecimiento económico y demográfico, y actualmente son mayores que nunca. Como consecuencia, se han alcanzado concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso sin parangón en por lo menos los últimos 800,000 años. Los efectos de las emisiones se han detectado en todo el sistema climático y es sumamente

probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX”.

En la figura 1, se muestran los rangos evaluados probables (bigotes) y sus puntos medios (barras) para las tendencias de calentamiento en el período 1951-2010 debidas a los GEI homogéneamente mezclados, otros forzamientos antropógenos (incluidos el efecto refrigerante de los aerosoles y el efecto de los cambios en el uso del suelo), forzamientos antropógenos combinados, forzamientos naturales y la variabilidad interna natural (que es el elemento de la variabilidad climática que surge espontáneamente en el sistema climático, aunque no haya forzamientos). El cambio observado en la temperatura en superficie se muestra en negro, con un intervalo de incertidumbre de 5% a 95%. La contribución de los forzamientos antropógenos combinados se estima con menos incertidumbre que las contribuciones de los gases de efecto invernadero y otros forzamientos antropógenos por separado (IPCC, 2014).



*Figura 1.* Contribuciones al cambio observado en la temperatura de la superficie 1951-2010 (IPCC, 2014).

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, ahora es evidente a partir de observaciones de aumentos en los promedios mundiales de temperatura del aire y el océano (IPCC, 2007). También se establece que el calentamiento de los últimos 50 años muy probablemente ha sido mayor que el de cualquier otro período durante por lo menos los últimos 1.300 años, cambios generalizados en la salinidad de los océanos, patrones de viento, cambios en los eventos extremos como sequías, tormentas, ondas de calor, mayor intensidad de los ciclones tropicales y sequías más prolongadas, particularmente en las regiones tropicales y subtropicales (Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla, 2007). En las gráficas siguientes se muestran los posibles escenarios de acuerdo con varios parámetros: a) Emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para las trayectorias de concentración

representativas (RCP) (líneas) y las categorías de escenarios asociados utilizados por el Grupo de trabajo III (las áreas coloreadas muestran el rango del 5% al 95%).

Las categorías de escenarios del Grupo de trabajo III (GT III) del IPCC, resumen los diversos escenarios de emisiones presentados en las publicaciones científicas y se definen sobre la base de niveles de concentraciones totales de CO<sub>2</sub> equivalente (en ppm) en 2100. **b)** Aumento de la temperatura media global en superficie, como función del total de las emisiones globales acumuladas de CO<sub>2</sub>. La zona en color rosáceo muestra la dispersión de las proyecciones pasadas y futuras a partir de una jerarquía de modelos del clima-ciclo del carbono basados en las emisiones históricas y las cuatro RCP (Representative Concentration Pathways) en todos los tiempos hasta 2100. Las elipses muestran el calentamiento antrópico total en 2100 frente a las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> de 1870 a 2100 a partir de un modelo climático simple para las categorías de escenarios utilizadas por el GT III. La elipse negra muestra las emisiones observadas hasta 2005 y las temperaturas observadas en la década de 2000-2009.

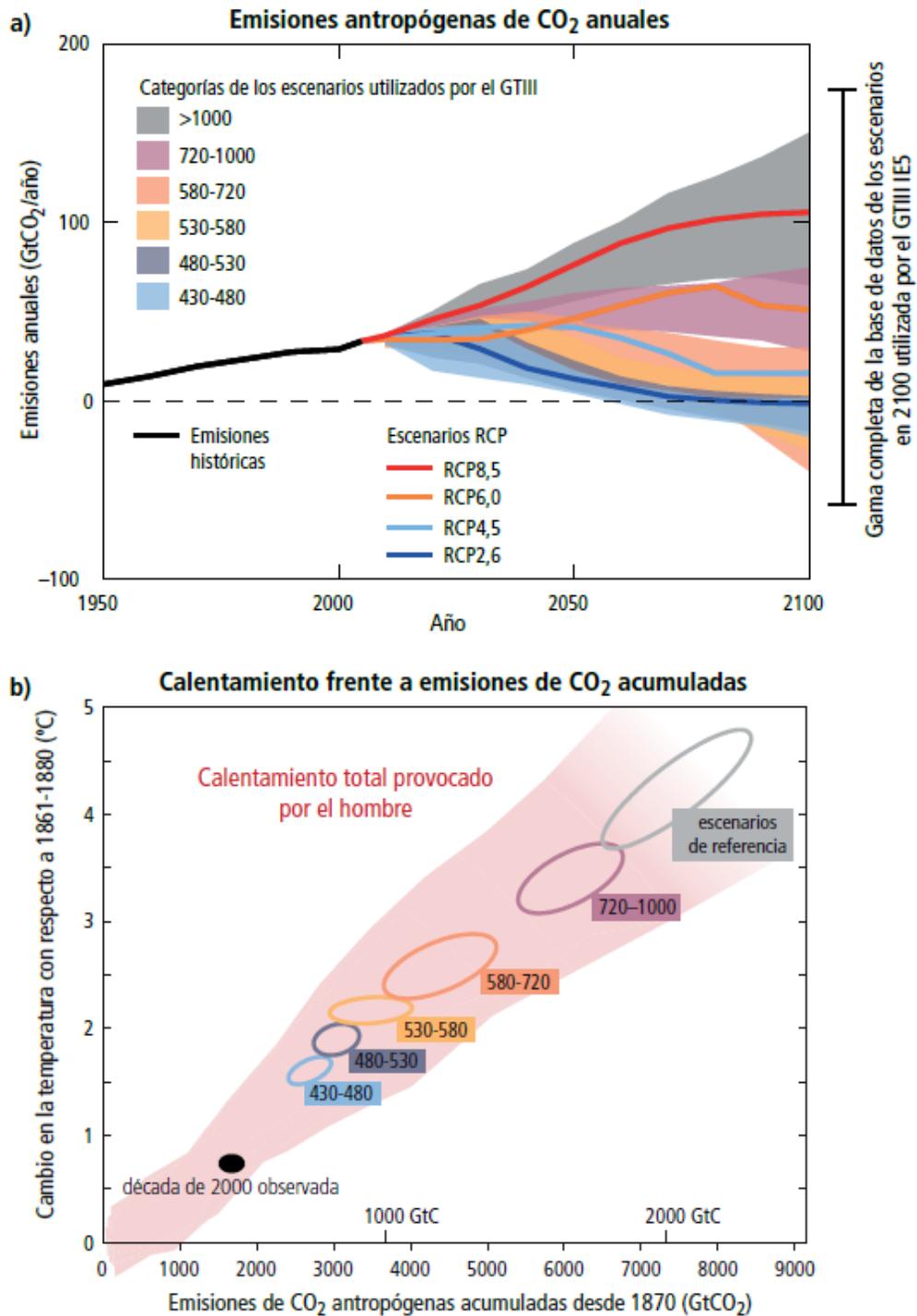


Figura 2. Emisiones antropógenas de CO<sub>2</sub> anuales y calentamiento frente a emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas (IPCC, 2014).

Cambios en la forma, cantidad e intensidad de precipitación también han sido observados, aunque con una variabilidad regional significativa (IPCC 2007). Podría pensarse que un aumento global de 0.74 ° C es muy poco para preocupar a la humanidad, sin embargo, ese aumento de global tiene variaciones regionales que pueden rebasar con mucho ese valor, por ejemplo, existen regiones cercanas al Polo Norte cuyos aumentos de temperatura rebasan los 3.5 ° C (Conde, 2010). Se espera que estas tendencias continúen en el futuro, con una gama diversa de efectos sobre el agua y sistemas de cuencas, los cuales son altamente sensibles a las variaciones climáticas. Esto se convierte en un desafío a largo plazo que requiere evaluaciones en distintas escalas espaciales y temporales que coadyuven a desarrollar e implementar estrategias adecuadas de adaptación (Johnson y Weaver, 2009).

Los riesgos y efectos del cambio climático se distribuyen de forma dispar entre los distintos grupos humanos, entre regiones y localidades; estos efectos son generalmente mayores para las personas y comunidades desfavorecidas. Existen relaciones distintas debido a estas diferencias regionales en los impactos observados del cambio climático. América Latina se reconoce como una región con grandes recursos de agua dulce, sin embargo, una temporalidad y la distribución espacial irregular de estos recursos afecta su disponibilidad y calidad según la región, ya que se ha documentado estrés en la disponibilidad de agua y en su calidad donde disminuye la precipitación y/o donde las temperaturas más altas ocurren (Magrin, 2007). Esta distribución dispar se aprecia en la figura 3, la cual muestra las proyecciones medias multimodelos de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) para el periodo 2081-2100 según los escenarios RCP 2 y RCP8,5 para **a)** cambio en la temperatura media anual en superficie, **b)** cambio en la precipitación media anual en porcentajes. Los cambios se muestran en relación con el periodo 1986-2005. En la

esquina superior derecha se indica el número de modelos de la CMIP5 utilizados para calcular la media multimodelos. Las tramas punteadas indican las regiones donde el cambio proyectado es grande con respecto a la variabilidad interna natural (superior a dos desviaciones típicas de variabilidad interna en promedios de 20 años) con 90% de concordancia con los modelos. Las tramas en líneas diagonales muestran las regiones donde el cambio proyectado es inferior a una desviación típica de la variabilidad interna natural en promedios de 20 años (Stocker *et al.*, 2013).

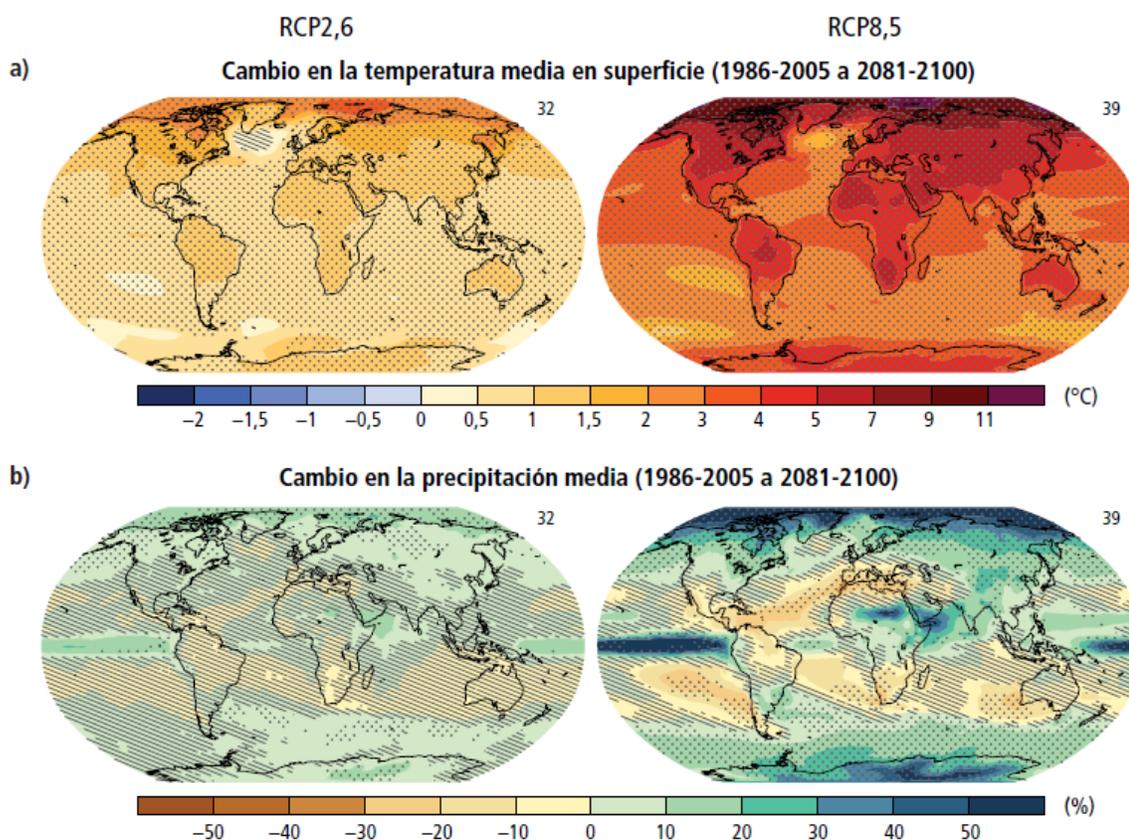


Figura 3. Cambios en la temperatura media en superficie y precipitación media (Stocker *et al.*, 2013).

El sistema climático y sus variaciones son condicionantes al rango de circulación de los recursos hídricos disponibles. Los cambios en la temperatura y precipitación, combinados con cambios en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, tendrá amplias implicaciones para los recursos hídricos, que afectarán el suministro, calidad y distribución de los recursos hídricos para millones de personas (Kundzewicz *et al.* 2007). Estos cambios pueden llevar a impactos diversos y están condicionados e interactúan con impulsores de cambio no climáticos y con las respuestas de gestión del agua. Es un recurso variable regional y localmente, así como la vulnerabilidad hídrica asociada, los peligros como las lluvias torrenciales o sequías también difieren según las regiones (Jiménez-Cisneros, *et al.* 2014). El cambio climático es uno más de los factores estresantes de los recursos hídricos, principalmente la precipitación y la evaporación potencial, que son factores climáticos muy relacionados con los recursos de agua dulce (Jiménez-Cisneros, *et al.* 2014).

Los resultados clave con alta o muy alta confianza del grupo de trabajo II del Cuarto Informe de Evaluación (Magrin *et al.*, 2007) con respecto al agua dulce fueron los siguientes:

- Los impactos observados y proyectados del cambio climático en sistemas de agua dulce y su gestión se deben principalmente a los aumentos en temperatura y nivel del mar, cambios locales de precipitación, y cambios en la variabilidad de esas cantidades.
- Las áreas semiáridas y áridas están particularmente expuestas.
- El cambio climático afecta la infraestructura de gestión y prácticas del manejo del agua.
- Los impactos negativos del cambio climático en los sistemas de agua dulce superan sus beneficios.

De acuerdo con las simulaciones del CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5, por sus siglas en inglés) para los recursos hídricos (SPM IPCC, 2013) se esperan varios efectos, los cuales quedan resumidas de la siguiente manera:

- Las regiones y temporadas húmedas serán más húmedas y las regiones y temporadas secas serán más secas (alta confianza). Lo anterior, a pesar de que los modelos tienden a subestimar las tendencias observadas en la precipitación (Noake *et al.*, 2012, en Jiménez-Cisneros, *et al.* 2014) y su sensibilidad a la temperatura observada (Liu *et al.*, 2012, en Jiménez-Cisneros, *et al.* 2014).

- La precipitación media global aumenta en un mundo más cálido, pero con variaciones sustanciales, incluidas algunas disminuciones, de región a región. La precipitación tiende a disminuir en latitudes subtropicales, particularmente en el Mediterráneo, México y América Central, y aumenta en otros lugares, especialmente en altas latitudes. Sin embargo, estos cambios generalmente se vuelven estadísticamente significativos sólo cuando la temperatura aumenta al menos 1.4 ° C (Jiménez-Cisneros, *et al.* 2014).

- Los cambios en la evaporación tienen patrones similares a los de los cambios en precipitación, con aumentos moderados casi en todas partes, especialmente en las latitudes más altas del norte. La disminución de la humedad del suelo es generalizada (confianza media a alta) (SPM IPCC, 2013). Se espera que la evapotranspiración aumente con los aumentos en la temperatura del aire (DHI, 2016).

- Dado que muchos embalses de agua subterránea se recargan de las aguas superficiales, se espera que, al aumentar la variabilidad de la precipitación, en cuanto a precipitación media pueden afectar las tasas de recarga de las aguas subterráneas (DHI, 2016).

- La precipitación más intensa también puede conducir a un aumento en la turbidez en los lagos y los reservorios debido a la erosión del suelo. En áreas semi-áridas y áridas, el cambio climático es probable que aumente la salinización del agua debido a la evapotranspiración y un aumento de las concentraciones de contaminantes (DHI, 2016).

En la tabla 1, quedan definidos los conceptos referidos a cambio climático.

Tabla 1. *Conceptos referentes a cambio climático concernientes a este trabajo.*

<b>Concepto</b>	<b>Definición</b>
<b>Exposición</b>	La exposición se refiere al grado de estrés climático sobre una unidad particular de análisis, puede estar representada por cambios en las condiciones climáticas o bien por cambios en la variabilidad climática, donde se incluye la magnitud y frecuencia de eventos extremos.
<b>Impactos</b>	Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos que ocurren en un lapso específico.
<b>Adaptación</b>	Proceso o capacidad del sistema de ajustarse al clima real o proyectado y sus efectos. En sistemas humanos se trata de moderar, evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.
<b>Mitigación</b>	Intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero. En este informe también se analizan las intervenciones humanas dirigidas a reducir las fuentes de otras sustancias que pueden contribuir directa o indirectamente a la limitación del cambio climático.
<b>Sensibilidad</b>	Es la medida de la susceptibilidad de la unidad de análisis a los impactos del cambio climático, también es el grado en el que un sistema es potencialmente afectado por un disturbio, interno, externo o un grupo de ellos.

Fuente: Conde (2012); (IPCC, 2014); Monterroso (2012).

### 3.1.2 Globalización económica y agricultura de riego

La globalización económica ha sido uno de los principales procesos que han transformado al mundo en las últimas cuatro décadas, con algunos efectos positivos, como la integración del conocimiento o el desarrollo de los sistemas de comunicación y transporte; pero también ha tenido resultados adversos, como el aumento de desigualdades sociales, la precarización del trabajo o la intensificación de los impactos ambientales. Es uno de los referentes económico-sociales más mencionados y debatidos de los últimos años; como puede esperarse de este tipo de nociones, la globalización ha dado lugar a una vasta literatura que abarca diversas esferas de la realidad y distintas disciplinas científicas (Dabat, 2002). Debido al alto grado de concepciones sobre globalización es necesario un breve recuento de algunos de los conceptos e ideas más relevantes sobre este fenómeno.

Es pertinente entender que la globalización económica es una de las consecuencias del actual sistema económico dominante, el capitalismo neoliberal, como un modelo que se asocia con políticas públicas que apoyan la amplia liberalización de la economía y el libre comercio en general. Se caracteriza por grandes reducciones del gasto público, así como la disminución de la intervención del Estado en la sociedad y la economía en favor del sector privado (Boas, 2009). Este sector se conforma principalmente por consumidores y empresarios; en determinados países, estos últimos llegan a desempeñar roles que anteriormente asumía y financiaba el Estado con impuestos de los contribuyentes. Además, es un proceso continuo y dinámico que llega a condicionar aspectos tecnológicos, sociales y culturales de un país, región o localidad, como pueden ser:

- a) La integración funcional de actividades económicas internacionalmente dispersas (Gereffi, 1995).
- b) Concentración del tiempo y el espacio (Harvey, 1995).
- c) Articulación en tiempo real de actividades sociales localizadas en espacios geográficos diferentes (Castells, 1998).
- d) Rebasamiento del Estado nacional por las nuevas relaciones transnacionales o mundiales (Beck, 1998).
- e) Mosaico global emergente de sistemas regionales y locales de producción y cambio (Scott, 1998).

Según la convergencia básica de estas posiciones, Dabat (2002) hace una síntesis basada en varias coincidencias explícitas o implícitas:

- a) La globalización no es solo un nivel superior de transnacionalización de la economía y la sociedad mundial, sino también una realidad histórica cualitativamente diferente a las anteriores;
- b) La globalización es un proceso histórico inseparable de una política del mundo bajo la dirección del capitalismo;
- c) La globalización tiene que ver con la redefinición del estado nacional, de sus funciones y relaciones con la economía y la sociedad, y no sólo con una disminución de capacidades frente al mercado.
- d) Los distintos aspectos jerarquizados son de carácter espacial-territorial (integración de actividades espaciales dispersas, concentración del espacio, nexos entre estado nacional y relaciones transnacionales, integración de sistemas regionales, relación de lo global con lo local, lo que provoca una reconfiguración de la geografía.

La globalización económica, puede definirse como un conjunto de procesos de producción y consumo que van de una escala local o nacional a una escala global, se manifiesta por el intrincado número de cambios interrelacionados, como el aumento de los tratados internacionales, inversiones extranjeras directas, alta actividad transnacional, movimiento internacional de trabajadores, y flujo de capital y tecnología a corto plazo (O'Brien y Leichenko, 2000; Najam, Runnalls y Halle, 2016). Esta definición abstrae los niveles de análisis espaciales o de escala; los procesos internacionales de producción (empresa transnacional); las capacidades del estado frente a un fenómeno económico mundial; y el predominio financiero del sistema capitalista actual.

La empresa transnacional (ETN) se convierte en pilar fundamental de estas profundas transformaciones. Constituye el núcleo articulador de la producción internacional integrada, debido a su reestructuración propiciada por una amplia y nueva integración tecnológica (la revolución en las telecomunicaciones, informática, procesos productivos, etc.), y la emergencia de la organización en red que articula y centraliza las nuevas redes de producción mundial (Morera, 2010). De acuerdo con Dunning (1993), las corporaciones o empresas transnacionales son “empresas que poseen o controlan actividades de valor agregado en dos o más países. La modalidad usual de posesión y control es a través de las inversiones extranjeras directas (IED), aunque las ETN pueden participar también en la producción foránea a través de alianzas con firmas del lugar de asentamiento”.

El proceso de transnacionalización de las empresas queda marcado por un mayor poder financiero, tecnológico y organizacional, e instituciones internas más sólidas, en comparación con los países receptores (Romero, 2014); de esta manera, las ETN obtienen una clara ventaja frente a las economías locales receptoras, comúnmente con limitados

recursos financieros y tecnológicos, pero con facilidades para la apropiación de recursos naturales, regulaciones laxas y mano de obra más barata. Su expansión corresponde a la creciente internacionalización de la producción, intensificada con la introducción de nuevas tecnologías en los procesos económicos y productivos, tanto que, en la actualidad es de común aceptación que las ETN son el motor de la globalización, ya que con su accionar han entretejido una compleja red de interrelaciones e interdependencias, que las vuelve elementos clave de la integración económica internacional (Romero, 2014).

En esta nueva etapa de la economía global, las barreras comerciales disminuyen, los mercados se amplían y la economía mundial se interconecta en los procesos productivos, de comunicación y mercantilización. Así, el capital y los factores de la producción fluyen por varias naciones y las empresas se internacionalizan; dando paso a una etapa del capitalismo donde la globalización económica termina por volverse un fenómeno hegemónico. Queda plasmada la idea de que el sistema económico no se enmarca en un conjunto de naciones independientes, sino en entidades estrechamente relacionadas, diferenciadas y algunas veces antagónicas (Graciano, 2013).

Aunque existe la percepción de que la globalización es un fenómeno de unificación de procesos que promueven la eficiencia; también hay argumentos sobre la desigualdad que genera debido a las diferencias regionales y la disparidad de los tratados internacionales entre las regiones económicas participantes (Mittelman, 1994). También ha incidido en el creciente monopolio de los medios de comunicación y producción mundial por redes de empresas transnacionales (Dabat, 2002). La multiplicidad de interrelaciones que promueve la globalización tiene efectos palpables según el sector, grupo humano y escala espacial. Además, en el ámbito ambiental, las afectaciones comienzan a vislumbrarse, también como

negativas, a pesar de que exista un discurso recurrente sobre las ventajas económico-laborales que promueven el desarrollo de cada vez más empresas transnacionales.

La relación entre ambiente y globalización económica, a menudo se pasa por alto, aunque es fundamental para ambos. El ambiente en sí es inherentemente global, está intrínsecamente relacionado con el desarrollo económico, ya que proporciona los recursos naturales que impulsan la producción y los servicios ambientales que sustentan los medios de vida. Si bien la importancia de la relación entre la globalización y el medio ambiente parece obvia, la comprensión de cómo interactúan estas dos dinámicas sigue siendo débil (Najam, Runnalls, y Halle, 2016). Es importante destacar que la globalización no solo impacta al ambiente, sino que el ambiente también afecta el ritmo, la dirección y la incidencia de las ETN, esto sucede porque los recursos ambientales proporcionan el combustible para la globalización económica, pero también porque las decisiones sociopolíticas influyen en el manejo de los recursos en relación con la dinámica de las ETN (Najam *et al.*, 2016).

Los recursos naturales (agua, petróleo, madera, metales, etc.) son la materia prima detrás de gran parte del crecimiento económico mundial. La cantidad de recursos utilizados ha crecido exponencialmente en los últimos años, principalmente por la expansión económica de las últimas décadas, lo que origina competencia y conflictividad por tales recursos; por ello, se reconfiguran los sistemas institucionales para garantizar la continuidad de los suministros y el control de los recursos críticos (Bromley, 2006). Es decir, existe una sobreexplotación de recursos para satisfacer el grado actual de producción que se requiere para mantener el actual modelo económico.

Mittelman (1998) sugiere que la transformación insostenible del medio ambiente en la globalización difiere del daño ambiental en épocas anteriores; el crecimiento a gran escala del producto económico mundial desde la década de 1950 no solo ha acelerado la ruptura de la base de recursos mundiales, sino que también ha alterado el espacio operativo seguro que ofrece la Tierra para la humanidad (Rockström *et al.*, 2009). La expansión de la actividad industrial intensiva en el uso de recursos que requiere la globalización es tan alta, que no puede haber reconciliación entre el adecuado uso de los bienes naturales y un crecimiento económico acelerado permanente.

La internacionalización de la producción, facilitada por el cambio tecnológico y la reducción de los costos de transporte, ha llevado el desperdicio y contaminación de los recursos naturales, así como de nuevos espacios de la Tierra (Newell, 1999). Los patrones de producción impulsados por las exportaciones alientan el desarrollo de cultivos comerciales intensivos en el uso del agua para aumentar su producción. El agua es esencial para el cultivo de alimentos y la seguridad alimentaria, pero en muchas partes del mundo ha sido uno de los recursos usados para la producción que más han sido sobreexplotados por causa de la agricultura, además de que los derechos de propiedad e irrigación del agua están mal desarrollados en la mayoría de los países (Anderson, 2010).

En este contexto se enmarca el modelo de agricultura intensiva de exportación (o modelo agroexportador), el cual requiere un alto número de relaciones internacionales y trascendencia de escalas geográficas. Requiere de una alta demanda de recursos naturales, tiene efectos locales que potencian la reestructuración de los componentes de un sistema socioambiental, depende de un alto grado de inversión y flujo de capital extranjero.

La globalización ha promovido la modernización de la agricultura incluyendo cultivos en tierras irrigadas con algún grado de sofisticación técnica, procedimientos de manejo de alto nivel y además una rígida estructura económico-política, que contempla su expansión como agricultura capitalista de gran escala (García, 1988). Estos cambios en los patrones de producción de la agricultura son una parte crucial del sistema terrestre, en virtud de la magnitud del uso de suelo por agricultura (Keys y McConnell, 2005). Ramankutty *et al.* (2002) han estimado que el 20% de la superficie terrestre con vegetación (alrededor de 18 millones de km<sup>2</sup>) está bajo uso agrícola a partir de 1992. Esta reconversión en el uso de suelo viene acompañada de la intensificación productiva, la cual se duplicó de 1970 a 2005 (Keys y McConnell, 2005) y se espera que la producción vuelva a duplicarse en las siguientes tres décadas, para satisfacer las crecientes demandas de alimentos, fibras, y nuevos combustibles (Tilman, 1999).

Se espera un aumento de áreas cultivadas y también un manejo intensivo de éstas. La intensificación agrícola es un proceso importante porque implica la alteración de los flujos naturales de los recursos. Al intensificar el aumento de las entradas por unidad de área o tiempo, se suplantán los procesos naturales de nutrientes y de recursos ambientales (principalmente agua), así como la regeneración ecológica de los ciclos naturales (Keys y McConnell, 2005).

En los países en desarrollo, las crecientes extracciones de agua y el agotamiento de los recursos hídricos a favor del riego, han favorecido el crecimiento económico, pero frecuentemente su efecto sobre el ambiente ha sido negativo (Lin, Perfecto y Vandermeer, 2008). A menos que se siga mejorando la productividad del agua, o haya cambios importantes en los sistemas de producción, la cantidad de agua consumida por la evapotranspiración

agrícola aumentará entre el 70 y el 90% hacia el año 2050; la cantidad total de agua evaporada en la producción de cultivos subirá entre 12,000 y 13,500 km<sup>3</sup>, casi duplicando los actuales 7,130 km<sup>3</sup>, lo cual corresponde a un aumento promedio anual de 100 a 130 km<sup>3</sup> (Lin, Perfecto y Vandermeer, 2008). Además de esto, hay que tener en cuenta la cantidad de agua necesaria para producir fibra y biomasa para energía, por lo que se espera un aumento de campos agrícolas intensivos, para poder saciar tal demanda (Molden *et al.*, 2007).

La tendencia hacia la intensificación agrícola está acompañada invariablemente por una necesidad creciente de recursos, incluidos agua y nutrientes. El riego localizado se extendió rápidamente desde la aparición de las tuberías de plástico en los años 70: desde casi 0.5 millones de ha en 1981 hasta casi 9 millones de ha en 2010 (FAO, 2016 a). Sin embargo, un mayor aumento en el uso de agua y fertilizantes no conduce a una mayor producción (Tilman *et al.*, 2002). El avance hacia una mayor irrigación se ha vuelto cada vez más difícil a medida que las fuentes de agua se han reducido como resultado de la sobreexplotación (Rosenzweig *et al.*, 2004). A su vez, la mayor demanda de nutrientes y agua se ve agravada por el hecho de que el proceso de intensificación también altera el ciclo de recursos del sistema en el que se instala la plantación (Lin, Perfecto y Vandermeer, 2008).

Actualmente el sector agrícola acapara 70 % del agua de ríos, lagos, glaciares y acuíferos subterráneos y llega hasta 90 % de los usos consuntivos del agua en algunos países en vías de desarrollo, con una tendencia al alza (World Water Assessment Programme, 2009). De acuerdo con la UNESCO, en 1950 se apropiaban 1,100 km<sup>3</sup> de agua dulce para uso agrícola, mientras que para 2014 se reportan cifras por encima de los 2,700 km<sup>3</sup> (FAO, 2016 b). De estas cantidades, el agua subterránea corresponde a 982 km<sup>3</sup>/año, lo que la convierte en la materia prima más extraída del mundo, de la cual 85 km<sup>3</sup> son para usos industriales, 209 km<sup>3</sup>

para usos domésticos-urbanos y 688 km<sup>3</sup> para irrigación; para México se reportan 29.45 km<sup>3</sup>, de los cuales 14.38% es para abastecimiento público, 4.72 % para generación de energía eléctrica 4.86 % para usos industriales y 76.04 % para irrigación, lo que lo ubican en la séptima posición mundial (Margat y Van del Gun, 2013; CONAGUA, 2017).

Tanto la cantidad como la calidad de los recursos hídricos son afectados por los sistemas agrarios intensivos, así como la distribución de los flujos de agua en las cuencas hidrográficas locales (Board, 2000). El impacto de los cultivos en el uso de agua dulce es mucho mayor en los sistemas irrigados que en los sistemas de temporal. Los confinamientos para el riego pueden regular los flujos aguas abajo, mientras que los sistemas de desagüe de suelos y campos desnivelados estacionalmente afectan la escorrentía y reducen la infiltración, lo que resulta en inundaciones locales más severas y disminución de los flujos de agua en climas secos (Bruijnzeel, 2001). Los cultivos mal manejados, a menudo se asocian con erosión del suelo, alta carga de limo y sedimentación aguas abajo. Los sistemas de producción intensivos y de altos insumos también provocan contaminación del agua por lixiviación o escorrentía que transporta nutrientes, pesticidas o desechos animales a los cursos de agua (Board, 2000; De Haan *et al.*, 1997).

El impacto negativo de los cultivos en los recursos hídricos también puede limitar la disponibilidad y aumentar el costo de uso aguas abajo (por ejemplo, a través de la reducción del suministro de agua doméstica). El riego en sistemas intensivos se basa en la extracción de aguas subterráneas y la desviación de los recursos hídricos superficiales en condiciones donde las lluvias de temporal son insuficientes para cubrir las necesidades de evapotranspiración durante el ciclo de los cultivos en temporadas secas, asegurando así la producción durante todo el año y maximizando los rendimientos; en el proceso, hay pérdidas

de agua, debido a escurrimientos e infiltración superficial. Esta infiltración contribuye a la recarga de agua subterránea, al control de inundaciones y a la prevención de la intrusión de agua salina (Renault y Montginoul 2003); sin embargo, cuando el nivel de intensificación aumenta, se reduce la infiltración y aumenta la evapotranspiración real (Cassman *et al.*, 2005).

La agricultura de riego requiere un mayor uso de agua y también promueve un uso más intensivo de la tierra con respecto al trabajo e insumos, como semillas mejoradas, fertilizantes y pesticidas, ya que tales insumos son generalmente necesarios para lograr los aumentos de rendimiento que son posibles cuando las limitaciones hídricas del cultivo crecimiento se eliminan. Para el 2010, había 252 millones de hectáreas de cultivos regados con agua subterránea en todo el mundo, cinco veces más que a principios del siglo veinte (FAOSTAT, 2004; Siabat *et al.*, 2010).

La amplia variabilidad en las dotaciones de agua dulce entre regiones y países tiene una gran influencia en el potencial para el desarrollo y la viabilidad a largo plazo de la agricultura de riego (Cassman *et al.*, 2005). En zonas donde las asignaciones han sido dirigidas mayormente a la agricultura, han existido conflictos derivados de la disparidad en las dotaciones o por la excesiva extracción. Dichas presiones han resultado en una regulación creciente de la asignación de recursos hídricos, como el fortalecimiento de la gobernanza del agua subterránea, promoción de las capacidades institucionales, formulación de políticas, gestión integrada (incluyendo el uso de mediciones, administración y monitoreo), así como concientización y participación de los usuarios (Foster y Shah, 2013).

Sin embargo, estas regulaciones son a menudo poco implementadas o basadas en lógicas meramente mercantiles, ya que la agricultura intensiva de exportación y la concentración de agua en pocas manos han puesto en entredicho las imágenes positivas que aluden a la agricultura moderna, productiva, rentable e integrada al mercado global; y a la vez, existe un uso diferencial del agua asociado a los mecanismos institucionales de concesión de derechos de agua, lo cual viene acompañado de su legitimación bajo los beneficios económicos que la agroexportación puede tener para cada país, región o localidad (Yacoub *et al.*, 2015).

El aumento en las áreas de cultivo para exportación y el uso del agua asociado a este tipo de agricultura, se explican por los cambios en las políticas agrícolas, que transitaron de un modelo de sustitución de importaciones a la consecuente adopción de un modelo neoliberal, que de acuerdo con Rojas (2013) tuvo como fin:

- a) Propiciar el cambio de patrón de cultivos y aprovechar las ventajas comparativas de México.
- b) Abandonar el cultivo de productos de autoconsumo y pasar a la horticultura, la fruticultura o la silvicultura mercantil, en las zonas donde el clima y el ambiente lo permitieran.
- c) Destinar parte de las divisas generadas por los respectivos productos agroexportables y así refinanciar la importación de alimentos básicos.
- d) Privatizar las empresas estatales con actividades vinculadas a la agricultura y que los precios se establecieran a través del libre mercado mediante oferta-demanda.

En México, las frutas y verduras son los cultivos para exportación que han experimentado un marcado aumento en el área de superficie cultivada. En 1980, este grupo ocupó cerca de

1,200,000 hectáreas (ha) (6.8% de superficie de suelo agrícola nacional), pero 30 años después, en 2009, esta cifra había aumentado a 1,950,000 ha (8.9% del área cultivada). Este crecimiento fue constante y contrasta con el de otros grupos de cultivos. La tasa de crecimiento promedio anual de 1.8%, para el sector frutas y verduras, fue mayor que el correspondiente para cereales (-1.1%) y cultivos industriales (0.1%), aunque debajo de los productos forrajeros (3.2%) (González, 2014). Esta expansión de la producción de frutas y hortalizas tuvo lugar principalmente en áreas con sistemas de riego o altas precipitaciones, aunque tales regiones son pocas y distantes. Según el INEGI (2004), 52.7% del territorio del país se caracteriza por déficit hídrico. Esas zonas incluyen desiertos y zonas áridas o semiáridas.

Para 2007, la superficie de riego en México era de 5.6 millones de hectáreas clasificada en dos categorías: sistemas de riego y unidades de irrigación, mientras que para el año 2017 eran 6.8 millones de hectáreas (ENA, 2017). Para el año 2008, la explotación de agua de ríos, arroyos y represas representaban el 70.8 % del área irrigada, mientras que por extracción de agua subterránea mediante sistemas de bombeo era el 29.2 % de la superficie regada; mientras que para el año 2017, el consumo de agua superficial era de 63.6 % y para aguas subterráneas de 36.4 % (CONAGUA, 2017b). Mientras tanto, casi la mitad de los municipios de México (45%) carecen de tierras de riego o tienen tan poca como 100 ha. En el extremo opuesto, encontramos que solo 216 municipios (8,8% del total) concentran el 50.3% de la superficie irrigada (INEGI, 2012).

En un país donde el 86% de la superficie agrícola depende exclusivamente de la lluvia, las áreas de irrigación representan un recurso estratégico para la producción de alimentos (ENA, 2017). En las regiones áridas y semiáridas, el valor estratégico del agua es mayor y

las actividades agrícolas compiten con la demanda poblacional. La competencia por el agua se vuelve crítica por los patrones cíclicos de las sequías que afectan a ciertas áreas del país, como en las áreas semiáridas en los estados de Guanajuato, Aguascalientes, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Oaxaca (González, 2014).

### 3.1.3 Vulnerabilidad hídrica

El agua es uno de los bienes ambientales más importantes, ya que está involucrada en todos los procesos que permiten el mantenimiento y la reproducción de la vida, así como todos los sectores que permiten el funcionamiento de la civilización. Muchos sectores y sistemas dependen de los recursos hídricos y de su disponibilidad, de modo que los cambios en los regímenes hidrológicos y la calidad del agua debido al cambio climático tendrá impactos socioeconómicos y ambientales negativos (Kundzewicz *et al.*, 2008). A pesar de su importancia, está altamente comprometida y afectada por un sinnúmero de estresores, a los cuales se suman en las últimas décadas el cambio climático y la globalización económica, con sus respectivos impactos particulares.

La distribución y disponibilidad de agua dulce, en específico la precipitación y la escorrentía, será errática, con alta diferenciación con respecto a las áreas del planeta que recibirán distintas cantidades de agua; además, se tendrán variaciones significativas en la disponibilidad de agua per cápita entre los países (WWAP, 2015). Las variaciones climáticas exacerbarán los efectos asociados con la distribución y disponibilidad del agua en conjunto con los distintos estresores del agua, como la intensificación de usos, contaminación, expansión industrial, cambios en el uso de suelo y en general toda degradación ambiental.

El estado del agua a nivel global difiere según la región, localidad, y sus respectivas especificidades. El acceso al agua se dificulta para millones de personas pobres por razones que van más allá del recurso físico como tal. En algunos lugares el agua abunda, pero es difícil hacerla llegar a la población, a causa de la falta de infraestructura y de acceso limitado, o como resultado de cuestiones socioculturales y políticas. En otros lugares, las demandas de la población sobrepasan las disponibilidades de recursos naturales, de esta manera, el acceso al agua no está garantizado para todos (IIMA, 2007), como se muestra en la figura 5.

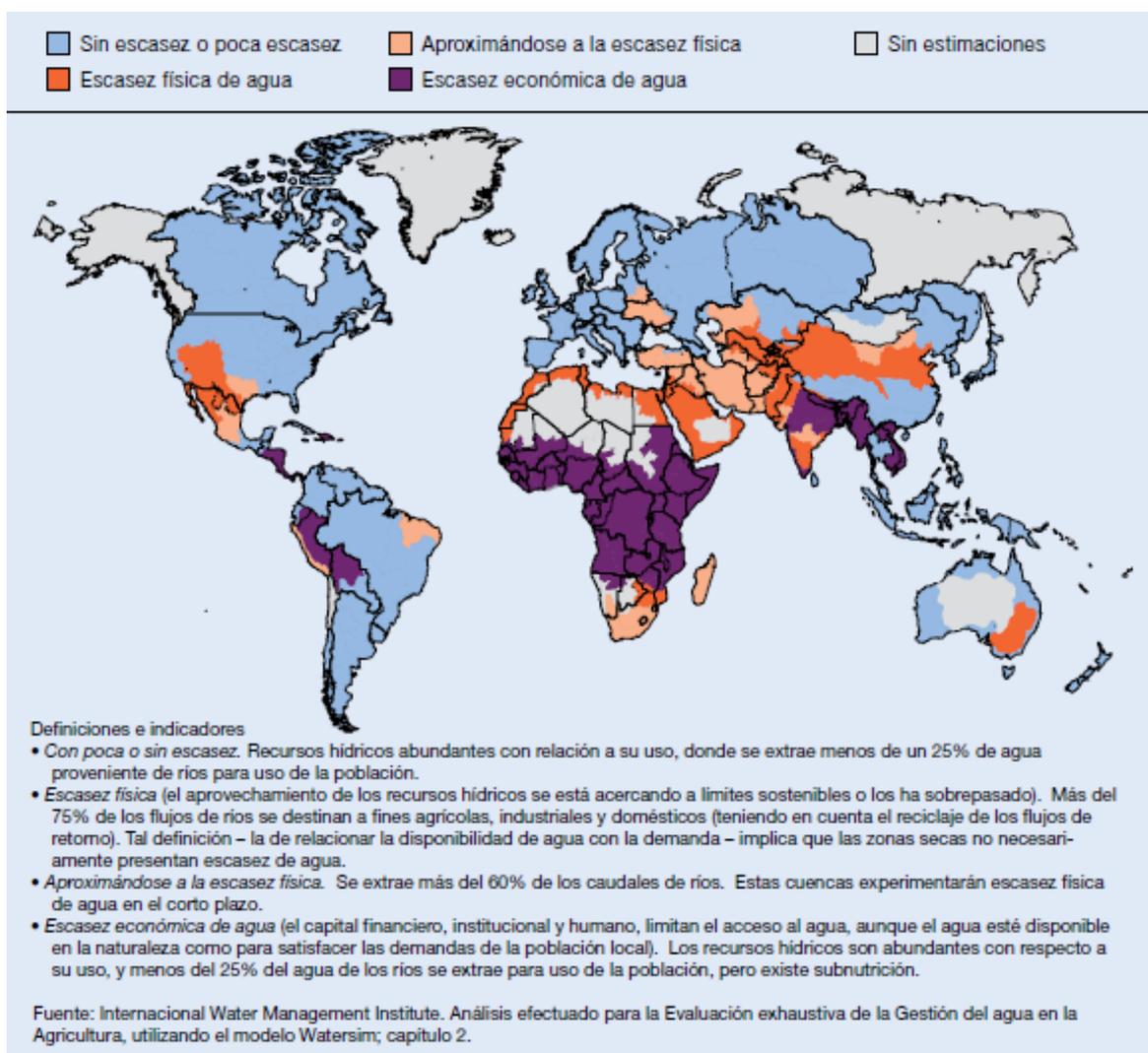


Figura 4. Zonas de escasez física y económica de agua (IIMA, 2007).

Las extracciones de agua están excediendo niveles críticos en muchas regiones de América del Norte, como el suroeste de Estados Unidos, y el norte y centro México (Romero-Lankao, 2014); la calidad del agua también es una preocupación, con 33.5 % de las aguas superficiales contaminadas (CONAGUA, 2017b). Para algunas cuencas hay casos con disminución de la calidad del agua, donde los impactos están relacionados con la extracción para agricultura y silvicultura (Hebben, 2009). La infraestructura de gestión del agua en la mayoría de las áreas de América del Norte está en necesidad de reparación, reemplazo o expansión, el cambio climático y los cambios en el uso de la tierra aumentarán estos impactos (Karl *et al.*, 2009). Además, se han encontrado variaciones en la escorrentía y los flujos de corriente en las cuencas hidrográficas, atribuidas al cambio climático y actividades humanas.

En la mayor parte de zonas áridas y semi-áridas de México se proyecta que los suministros de agua sufrirán de mayor estrés por el cambio climático, lo que resulta en una menor disponibilidad de agua y el aumento de las condiciones de sequía; la capacidad de los sistemas hídricos para cubrir la demanda de los usos legítimos del agua se verá disminuida y su vulnerabilidad a condiciones adversas se intensificará. (Romero-Lankao *et al.*, 2014). Estas circunstancias representan un desafío mayor para países como México, donde ya se tienen grandes retos para la gestión adecuada de los recursos hídricos. Estos desafíos señalan ya varias crisis del agua en distintas zonas del país, que están limitando el bienestar de esas regiones (Val-Segura y Arriaga-Medina, 2015).

El aumento de temperatura, la disminución de la precipitación y aumento de la intensidad de los eventos extremos proyectados para México en la segunda mitad de este siglo como

resultado del cambio climático afectará la disponibilidad y distribución de recursos hídricos en todas las zonas del país. Además, la mayoría de los problemas causados por los factores anteriores afectarán a las poblaciones más vulnerables. Se espera un aumento en la vulnerabilidad de grupos y sectores específicos, los cuales ya tienen una carga de degradación socioambiental acumulada. Las proyecciones climáticas indican que a medida que aumenta el calentamiento global, será menos frecuente y más concentrada la precipitación; la disponibilidad anual promedio de agua per cápita disminuirá rápidamente y a un ritmo creciente, especialmente en las regiones áridas y semiáridas de México (Val-Segura y Arriaga-Medina, 2015). En México, la disponibilidad promedio de agua *per capita* ha disminuido en 66% en 50 años, de 11,500 m<sup>3</sup> en 1955 a 3,822 m<sup>3</sup> en 2005; la disponibilidad de hídrica se redujo en un 22%, de 4,900 m<sup>3</sup> en 2000 a 3,822 m<sup>3</sup> en 2005 y se espera una disminución de 3.285 m<sup>3</sup> en 2030 y 3.260 m<sup>3</sup> en 2050 (Montes-Rojas, Ospina-Noreña, Gay-García, Rueda-Abad y Navarro-González, 2015).

Debido a la ubicación geográfica de México existe alta heterogeneidad en los valores de la precipitación; dos tercios del territorio mexicano se encuentran en un área donde la lluvia es escasa, con áreas del norte con sólo 169 mm, y por otro lado, en el sur hay áreas elevadas de la cuenca del río Grijalva que experimentan valores anuales de 4,200 mm; también existe una distribución temporal muy alta, ya que el 68% de las lluvias anuales ocurren entre junio y septiembre (Val-Segura y Arriaga-Medina, 2015). Estas disparidades territoriales también se presentan en la cobertura de agua potable, mientras que estados como Jalisco o Baja California Sur tienen cobertura de 98% para las zonas urbanas; los estados con los grados más altos de marginación, como Oaxaca y Chiapas, alcanzan el 85% de la provisión del servicio en zonas urbanas y sólo el 66 % en zonas rurales (CONAGUA, 2014). Esto significa

que alrededor de 9.5 millones de personas no tienen servicio de suministro de agua y de éstos, 5.5 millones de personas están ubicadas en zonas rurales, en lugares con menos de 2,500 habitantes (CONAGUA, 2014).

La sensibilidad de los recursos hídricos a los impactos del cambio climático es alta; las áreas semiáridas y áridas son particularmente vulnerables debido a lluvias erráticas y a los flujos de precipitación que se concentran en unos pocos meses y registran grandes variaciones anuales. Estas zonas no sólo enfrentan los problemas técnicos, financieros y desafíos institucionales que son inherentes a la gestión del agua, sino también enfrentarán los problemas adicionales relacionados con la variabilidad climática, especialmente la precipitación, que puede convertirse en períodos secos (Lenton, 2004). Lo anterior sucede actualmente en México, con zonas áridas en una gran parte del territorio y que además adolecen de distintos problemas técnicos, financieros e institucionales

En México, los sectores agrícola, industrial, urbano y turístico ejercen una gran presión sobre los recursos hídricos; lo que afecta a las comunidades y ciudades cuyo suministro de agua es limitado, volviéndolas más vulnerables (Montes-Rojas *et al.*, 2015). Además, la sobreexplotación de los acuíferos, el tratamiento inadecuado de las aguas residuales y la intensificación del sector agrícola, aumentan la vulnerabilidad futura de los recursos hídricos (González *et al.*, 2011). Es en este sentido que dos exposiciones globales en zonas con alta vulnerabilidad asociada, tendrá serias afectaciones acumuladas, que se manifestarán en un aumento de vulnerabilidad en distintas escalas, sectores y sistemas socioambientales específicos.

En términos conceptuales la vulnerabilidad puede ser entendida como el grado en que un sistema, subsistema o componente del sistema es propenso a experimentar un daño debido a la exposición a un desastre, una perturbación, estrés o estresor (Adger, 2006). Esta definición se ha enriquecido de las investigaciones sobre riesgo, desastres, impactos climáticos y resiliencia. De esta forma, ha habido una incorporación de los aspectos ecológicos y humanos, añadiendo los componentes de exposición, sensibilidad del sistema, resiliencia y capacidad adaptativa (Turner, 2003). Esta formulación es dependiente de los métodos de investigación, las implicaciones sobre capacidad adaptativa, la formulación de los objetivos, entre otros (Adger, 2006).

La vulnerabilidad se representa como una construcción dinámica, operacionalmente simultánea a diferentes escalas y resultante de múltiples estresores. La vulnerabilidad a los cambios ambientales globales es la inhabilidad para hacer frente a las presiones externas, dejando el potencial para un resultado adverso (O'Brien *et al.*, 2004). De esta forma se entiende, que cada unidad de análisis puede ser vulnerable. La manifestación de la vulnerabilidad varía con el nivel de análisis y el contexto específico, es decir, la vulnerabilidad es altamente diferenciada (Ericksen, 2008). Lo anterior se debe a las sinergias entre procesos múltiples y dinámicos, que combinados causan vulnerabilidad (Leichenko y O'Brien, 2002).

La vulnerabilidad es un proceso dinámico a través del cual los grupos humanos y los distintos ambientes naturales están sujetos a daños o amenazas ocasionados por factores biofísicos y sociales, lo que conduce a una situación de limitada capacidad de respuesta frente a tales contingencias y grandes dificultades para adaptarse a los nuevos escenarios (Ávila, 2014). La vulnerabilidad representa una interfase de múltiples amenazas para el bienestar y

las capacidades de la sociedad para hacerles frente, estos estresores son una combinación de procesos biofísicos y sociales. De esta manera, la vulnerabilidad se expresa como un problema multifactorial y dinámico, dependiente de los grupos, sectores o ambientes sujetos a un posible efecto adverso, los cuales pueden ser de distintas magnitudes y naturalezas.

La vulnerabilidad para los grupos humanos puede entenderse como una construcción o consecuencia sociológica, ya que, de manera natural, no existe una condición implícita al ambiente que identifique como zona de vulnerabilidad a un espacio geográfico específico (Gay y Rueda, 2012). En este sentido, la vulnerabilidad social puede combatirse a partir de decisiones y acciones humanas que pueden cambiar las condiciones y factores que promueven la vulnerabilidad (Landa, Ávila y Hernández, 2010). Sin embargo, la vulnerabilidad humana, está íntimamente relacionada con la vulnerabilidad biofísica de las zonas o ambientes donde se encuentran los asentamientos humanos. Si la vulnerabilidad está en función de la exposición, sensibilidad y capacidades adaptativas, entonces las evaluaciones de vulnerabilidad requieren establecer cómo funcionan y se relacionan esas variables a distintas escalas; ya que las decisiones sobre adaptación o reducción de vulnerabilidad requieren un nivel adecuado de operación (Monterroso, Conde, Gay, Gómez y López, 2014).

Se han presentado algunos casos de consenso en la definición, lo más reciente es en el quinto reporte del IPCC, 2014, que define vulnerabilidad como la propensión o predisposición de ser afectado de forma adversa por estrés, choques ambientales o climáticos, se incluye la sensibilidad o susceptibilidad al daño, así como la falta de capacidades para enfrentar o adaptarse a la perturbación. Esta definición suscribe la noción de exposición que se refleja en las áreas sujeto de desastres climáticos; un componente social que depende de

un amplio rango de características individuales y comunitarias; así como los factores económicos, culturales y políticos, que pueden incrementar la susceptibilidad al daño y reducen la capacidad de responder a los estresores climáticos (Leichenko y Silva, 2014).

Además, atendiendo al carácter multifactorial de la vulnerabilidad e impactos asociados con el cambio climático, ésta debe ser dimensionada de acuerdo con la escala espacial y social considerada. Las variables que describan la vulnerabilidad deberán mostrar ser una clara descripción de las características del estado y la capacidad de respuesta del contexto particular en estudio (González *et al.*, 2011). Entonces, si el cambio climático impactará a todas las regiones del mundo, se podrán gestar distintos grados de vulnerabilidad asociada al cambio climático, dependiendo de la magnitud, tipo y rapidez de los cambios a los que esté expuesto un sistema, sensibilidad y capacidad de adaptación; así, sectores que actualmente no son vulnerables pueden ingresar a esta categoría (Gay y Rueda, 2012).

La vulnerabilidad hídrica es un proceso socioambiental complejo, donde los efectos pueden observarse en el agua misma como unidad de análisis o en la totalidad del sistema socioambiental, e intervienen diversos factores, entre ellos, los aspectos geofísicos, económicos, climáticos y sociopolíticos. Y cada factor puede ser analizado según los aspectos sujetos de análisis, descomponiéndose la vulnerabilidad por presión hídrica, por explotación de acuíferos, por disponibilidad de agua, por marginación social, por sectores económicos, urbanos o rurales (Ávila, 2007).

El carácter complejo de la vulnerabilidad hídrica también depende de los procesos asociados, entre ellos: los biofísicos, como el clima, los ciclos ecosistémicos y los ciclos hidrológicos; los económico-productivos, los procesos socioculturales, como el consumo, la

valoración del agua, las formas de acceso diferencial; y los procesos político-institucionales, entre ellos, el manejo de los conflictos y las regulaciones sociales. Estos procesos promueven la pérdida de seguridad hídrica, la cual significa que cualquier persona tenga acceso a agua inocua y suficiente a un costo accesible que conlleve a una vida higiénica, saludable y productiva, mientras se garantiza que el ambiente natural sea protegido y restaurado (GWP, 2000).

La seguridad hídrica y la vulnerabilidad son dos conceptos estrechamente relacionados, ya que en la medida que una sociedad pierde seguridad hídrica se torna más vulnerable, además de promover conflictos socioambientales como expresión de la pérdida de seguridad hídrica que lleva a escenarios de crisis de agua (Ávila, 2012). Los escenarios de crisis son impulsores importantes de las reconfiguraciones parciales o totales de los sistemas socioambientales, ya que involucran las decisiones y acciones de los involucrados, así como el posible agotamiento de recursos y el eventual colapso generalizado, entendido como la supresión de la dinámica, estructura, identidad y funciones del sistema.

Los conflictos por el agua son alimentados por la falta de seguridad hídrica y sus eventuales crisis, el conflicto queda definido como las tensiones que surgen entre actores y agentes sociales por el control del agua; por un acceso y distribución desigual; por los cambios en las percepciones y valores sobre su uso; y por la incompatibilidad de intereses ante los cambios en las formas de gestión del agua (Ávila, 2014). Estos conflictos son resultantes de los daños socioambientales percibidos, así como de un uso del recurso que se asimila como injusto, de esta forma, el agua pasar a un esquema que no incluye la gestión integral, que puede incluir una apropiación directa por parte de los sectores más favorecidos, que promueven esquemas de mercantilización del agua.

Las condiciones hídricas de México son propensas a efectos adversos ante el cambio global, ya que existe una alta concentración poblacional y productiva, condiciones espaciales y estructurales muy sensibles definidas por las zonas áridas y semi-áridas, y una oferta de agua reducida; de los 653 acuíferos, 105 se encuentran en condiciones de sobreexplotación y no existe disponibilidad para varias cuencas hidrológicas del país (Oswald, 2012a; CONAGUA, 2018a). Las complejas interrelaciones entre fenómenos socioambientales han agudizado los conflictos y han provocado enfrentamientos por el usufructo de manantiales, pozos y ollas de agua (Oswald, 2012a).

La presencia de conflictos dificulta la gestión integrada del agua, y su resolución es complicada, entre otros factores, por el enfrentamiento entre sectores y agentes sociales antagonistas, la falta de justicia ambiental, baja institucionalidad, y un mayor detrimento del agua, ya sea en calidad o cantidad. Esto dificulta el diseño conjunto y la operabilidad de posibles medidas de adaptación o programas de disminución de vulnerabilidades. Lo anterior da como resultado una agudización de la problemática del agua, que se materializan en diversas afectaciones, que de acuerdo con Ávila (2012), pueden incluir los siguientes:

- Pérdida de autosuficiencia alimentaria al priorizarse la agricultura mercantil y destinarse el agua de calidad a cultivos de exportación.
- Aumento de la vulnerabilidad.
- Acceso diferencial al agua entre la población, que se exagera con elevados niveles de pobreza, desigualdad social y diferencias urbano-rurales.
- Deficiente calidad del agua para consumo humano, contaminación difusa y afectaciones en la salud de los núcleos poblacionales
- Deterioro de ecosistemas y servicios ecosistémicos relacionados al agua.

- Creación de marcos legales que favorecen la privatización y valoración económica del agua.

Entre los principales factores que promueven pérdida de seguridad hídrica y aumento de vulnerabilidad de los recursos hídricos para México están: el aumento de temperatura y variabilidad en la precipitación; la reducción en la disponibilidad de agua; la contaminación y deterioro de la calidad del agua; los conflictos y luchas por el agua; el aumento de los niveles de pobreza y desigualdad social; cambios biofísicos, como la disminución en la escorrentía e infiltración; cambios en la evapotranspiración; sobreexplotación e intensificación en los usos del agua; y cambios político-económicos que promueven esquemas de gestión inequitativos (Ávila, 2007; Ospina-Noreña, Gay, Peña y Hare, 2013; Oswald, 2012b).

Debido a la multidimensionalidad de factores que confluyen en la vulnerabilidad, su evaluación debe atender las diferentes dimensiones de la problemática, así como tomar en cuenta el sector, grupo y ante qué se es proclive a sufrir un daño. En este sentido, el presente trabajo se avoca a la evaluación de la vulnerabilidad del agua en un sistema socioambiental, con el fin de abarcar los factores más relevantes que intervienen en este proceso.

#### 4 Área de estudio: el agua como factor crítico en la cuenca de la Independencia

La cuenca de la Independencia cubre alrededor de 7,017 km<sup>2</sup> en total, mide aproximadamente 100 km por 70 km de ancho (Palacios, 2012). También es llamada cuenca alta del río Laja se encuentra al noreste del estado de Guanajuato, formando parte de la región hidrológico-administrativa número VIII – Lerma-Santiago-Pacífico; dentro de este sistema, la cuenca de la Independencia es una de las más importantes por el volumen de descarga que aporta al río Lerma (Mora, Carmona y Cantoral-Uriza, 2015). Se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas: latitud 21° 33' norte, longitud 101° 31' oeste en el extremo noreste y latitud 20° 46' norte, longitud 100° 11' oeste en el extremo suroeste (Palacios y López, 2010). Se ubica a 100 km al sur de la ciudad de San Luis Potosí. Incluye los municipios de San Miguel de Allende, Dolores Hidalgo, San Diego de la Unión, San Luis de la Paz, San Felipe, San José Iturbide, y Doctor Mora (Figura 5).

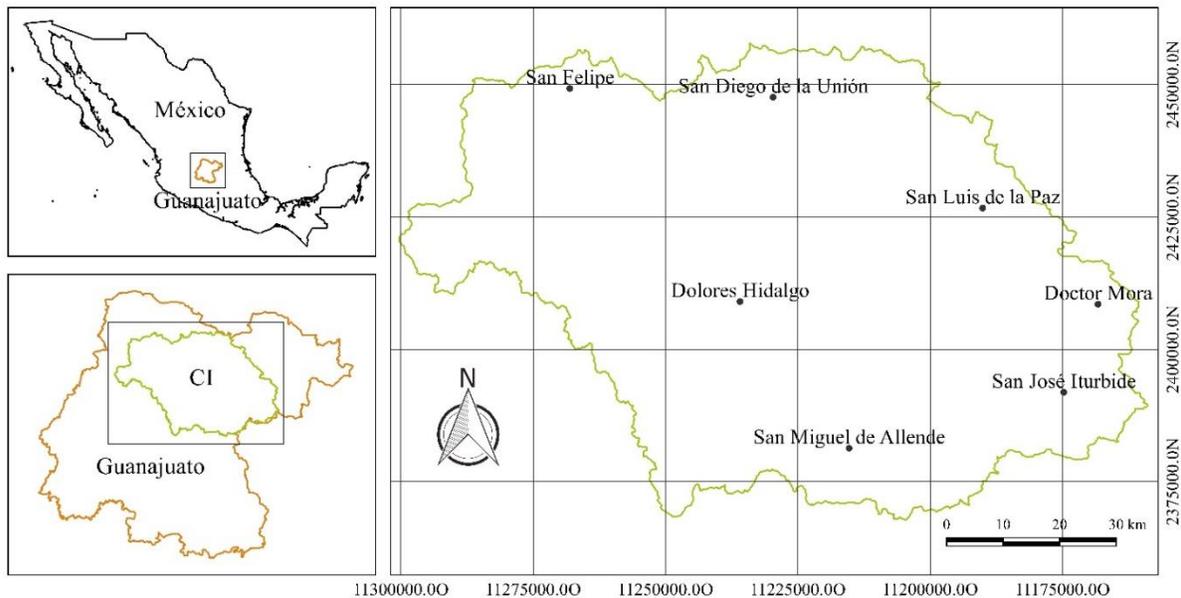


Figura 5. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

San Miguel de Allende tiene una población de 171,857, el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 1532 a nivel nacional. Perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre, 2014, está conformado por 512 localidades. 5.86 % con alto grado de muy alto, 49.61 % marginación alta, 3.52 % marginación media, 2.15 % marginación baja, 4.69 % marginación muy baja y 34.18 % no clasificadas por rezago social. Tres localidades son urbanas con 75, 291 (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

Dolores Hidalgo tiene una población de 152,113, el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 1317 a nivel nacional. Perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre, 2014, está conformado por 525 localidades. 11.05 % de localidades muy alto grado de rezago social, 51.05 % alto grado, 3.52 % con grado medio, 8.95 % con grado bajo, 3.43 % con grado muy bajo y 24.57 % no clasificadas por rezago social. Una localidad es urbana, con 59,240 habitantes (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

San Diego de la Unión tiene una población de 39,668, el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 922 a nivel nacional. No perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre, 2014. Está conformado por 186 localidades. 4.84 % de localidades tienen grado de rezago social muy alto, 65.05 % grado alto, 5.91 % grado medio, 1.61 % marginación baja y 22.58 % no clasificadas por rezago social, posee dos localidades urbanas con 9983 habitantes (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

San Luis de la Paz tiene una población de 121,027, el grado de rezago social es medio, se ubica en el lugar 1,377 a nivel nacional. Perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre en 2014; está conformado por 450 localidades. 16.22 % de localidades tienen grado de rezago social muy alto, 42.67 % grado alto, 5.56 % grado medio, 1.78 % grado bajo, 0.67

% grado muy bajo y 33.11 % no clasificadas por rezago social, posee tres localidades urbanas con 59,259 habitantes (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

San Felipe tiene una población de 113,109; el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 1,088 a nivel nacional. Perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre en 2014, está conformado por 433 localidades. 17.78 % de localidades tienen grado de marginación muy alto, 43.65 % marginación alta, 6.70 % marginación media, 0.46 % marginación baja y 31.41 % no clasificadas por rezago social, tiene cuatro localidades urbanas con 40,662 personas (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

San José Iturbide tiene 78,794 habitantes, el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 1,783 a nivel nacional. No perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre del 2014, está conformado por 213 localidades. 3.29 % de localidades tienen grado de rezago social muy alto, 36.62 % grado alto, 18.78 % grado medio, 6.57 % grado bajo, 1.88 % grado muy bajo y 32.86 % no clasificadas por rezago social, tiene dos localidades urbanas con 26,729 personas (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

Doctor Mora tiene 24,219 habitantes, el grado de marginación es medio, se ubica en el lugar 1,197 a nivel nacional. No perteneció al programa Cruzada Nacional contra el Hambre de 2014, está conformado por 71 localidades. 5.63 % de localidades tienen grado muy alto de rezago social, 71.83 % grado alto, 8.45 % grado medio, 2.82 % grado bajo, 1.41 % grado muy bajo y 9.86 % no clasificadas por rezago social, tiene una localidad urbana con 5,140 habitantes (SEDESOL, 2015; SEDESOL, 2017; INEGI, 2015).

Todos los municipios que comprende la cuenca dependen en mayor grado de fuentes subterráneas para conseguir el agua para el consumo humano, usos domésticos e industriales (Ortega-Guerrero, 2009). La cuenca de la Independencia se encuentra en condiciones de escasez hídrica debido a las altas tasas de recambio de los acuíferos (De León, 2005).

En la cuenca existe una amplia variedad de cultivos, pero los de mayor importancia son la alfalfa, sorgo, maíz, trigo, avena, cebada, brócoli, cebolla, ajo, apio, coliflor y lechuga. Según las estadísticas estatales, los cultivos de brócoli y lechuga convierten al estado en el primer productor de estas hortalizas en el país. De acuerdo con las estadísticas federales, durante 2009 se cultivaron 200,487 toneladas de brócoli, 60.2% del total nacional de la hortaliza; y en el 2010, se cultivaron 172,166 toneladas de brócoli que representó 56.2% del total nacional (INEGI, 2010). Los cultivos imperantes son monocultivos a gran escala para exportación, con el consiguiente desgaste en suelo y uso intensivo del agua. El cambio de los cultivos tradicionales y básicos a los cultivos forrajeros y hortícolas fue posible debido a la perforación excesiva de pozos profundos mediante sistemas de bombeo, lo que ha dado como resultado la sobreexplotación del acuífero.

Las presiones a este sistema por la agricultura de exportación han derivado en una serie de conflictos entre los agricultores y las poblaciones que ya han sufrido enfermedades por agua contaminada. Por tanto, es importante dilucidar los posibles efectos socioambientales, que los campos agrícolas de exportación pueden provocar en este lugar. Debido al elevado número de factores y actores que se relacionan en estos intrincados procesos, es necesario observarlos como un sistema, es decir, un conjunto de elementos y relaciones específicas que dependen uno de otro para poder ser definidos como un todo, en la cual los elementos no son separables y por lo tanto no pueden ser estudiados aisladamente (García, 2006). Existen

varios elementos que pueden ser afectados en cuanto al aprovechamiento hídrico, se promueven transformaciones en los distintos subsistemas involucrados y tendrán efectos en la vulnerabilidad actual y futura, tomando en cuenta las variaciones climáticas.

El estrés hídrico en la cuenca hidrográfica de la Independencia (CI), ha sido un grave problema debido a la concesión de agua para pozos profundos con fines agrícolas. La situación actual del acuífero de la Independencia es de sobreexplotación del agua subterránea, con una tasa de recambio del 100%. El número de perforaciones de los pozos en la Cuenca sigue en aumento. Este aumento de perforación de pozos entre los años 1968 y 2002, han sido para distintos usos, incluyendo el potable, doméstico y agroindustrial. Se empezó a perforar pozos en la cuenca a principios de los años cincuenta, con 250 pozos y para el año 2008 se detectó que el número de pozos en la cuenca era de 2,368 (Navarro, 2006). Se alcanzó esta gran cantidad de perforaciones en el corto lapso de 60 años, los cuales extraen más de 1,000 millones de m<sup>3</sup>/año. De los pozos que existen en este momento 80% extraen agua del acuífero granular y 20% del acuífero volcánico fracturado (Navarro, 2006).

La CI reúne los elementos principales para considerarla como un sistema hidrogeológico sobreexplotado. Esto es el resultado, por un lado, de una reducida disponibilidad del agua subterránea determinada por las condiciones climatológicas semiáridas, los bajos volúmenes de la recarga y una limitada renovación del recurso hídrico; y por el otro, de la intensiva extracción llevada a cabo durante las últimas décadas. El tiempo de renovación natural del sistema hidrogeológico habla a favor de un recurso hidráulico con características fósiles, no renovable en términos de la escala humana y altamente vulnerable a su agotamiento en las condiciones actuales de explotación (Navarro, 2006).

Actualmente, debido a la explotación irracional del acuífero a través del constante bombeo del agua subterránea, los niveles piezométricos están bajando de manera severa. Las estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2000) señalan que los niveles del agua de los pozos en la cuenca durante 1988 bajaban entre 1.4 y 2.5 metros por año; mientras que para el año 1996 se reportaron descensos anuales del orden 2 a 7 m en la porción NE de la cuenca. El descenso del nivel piezométrico durante la década de 1980 empeoró en el decenio siguiente. En el año 1998, se encontró que el nivel del agua en los pozos estaba entre 50 y 130 m, mientras que algunos reportes de agricultores de la zona, para el año 2008, indicaban que los niveles estaban a más de 200 m en la parte noreste de la cuenca (Ortega, 2009).

Las autoridades como la CEAG (Comisión Estatal del Agua) y la CONAGUA han reconocido una extracción desproporcionada por el sector agrícola. En 1996, la CEAG reportó que en el denominado “Acuífero de la Laguna Seca” el sector agrícola usaba 95.7% del agua subterránea extraída. En 2009, la CONAGUA reportó que en el llamado “Acuífero de la Cuenca Alta del Río Laja”, 90% del agua subterránea estaba destinado a la agricultura. También en 2009, la CONAGUA reportó que en el denominado “Acuífero de San Miguel de Allende,” el sector agrícola usaba 95.75% del agua subterránea extraída. Se reconoció también en 2011, que en el “Acuífero Dr. Mora-San José Iturbide” el sector agrícola era el principal usuario del agua subterránea.

El agua que se halla en los flujos regionales, que forman parte del acuífero volcánico fracturado, tiene un tiempo de residencia de miles de años. Esto significa que el agua contenida en el acuífero fracturado es agua fósil. Por estar en contacto con las rocas y minerales del acuífero volcánico fracturado durante miles de años, el agua fósil se equilibra

con los minerales presentes en su ambiente. El agua se satura con estos minerales, los cuales aumentan la temperatura por la misma desintegración de los minerales presentes en las rocas volcánicas del acuífero fracturado (Ortega, 2009). Las fracturas en los niveles piezométricos han generado procesos geoquímicos naturales que producen un exceso de flúor y otros minerales bioacumulables, que han provocado un aumento en las incidencias de cáncer, fluorosis dental, renal y esquelética (Ortega, 2002).

El cambio de los cultivos tradicionales y básicos a los cultivos forrajeros y hortícolas fue posible debido a la perforación excesiva de pozos profundos en la cuenca de la Independencia y su consiguiente sobreexplotación.

En la cuenca de la Independencia, una región con fuertes presiones socioambientales, las variaciones climáticas son un factor clave, ya que las variaciones en temperatura y precipitación pueden llevar a una reconfiguración o el colapso del sistema hídrico, con las consecuentes afectaciones en la provisión de agua en los distintos asentamientos humanos que se encuentran en la cuenca.

En el atlas nacional de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático (IMTA, 2016), se muestra alta vulnerabilidad en la región central del país ante los efectos del cambio climático. Para determinar el grado de exposición, incorporaron el cambio en la precipitación anual y los antecedentes históricos para las sequías: además utilizaron la relación entre la brecha hídrica con la oferta, la cual tiene por objeto cuantificar la dificultad que una célula de planeación tiene para satisfacer su demanda al 2030. El componente de sensibilidad evaluó el grado de afectación ante el cambio climático y la magnitud del daño en caso de una disminución en la precipitación. También incorporó la cantidad de habitantes en los centros

poblacionales: entre mayor sea el tamaño de un centro poblacional, será más vulnerable ante la presencia de sequías (Figura 7).

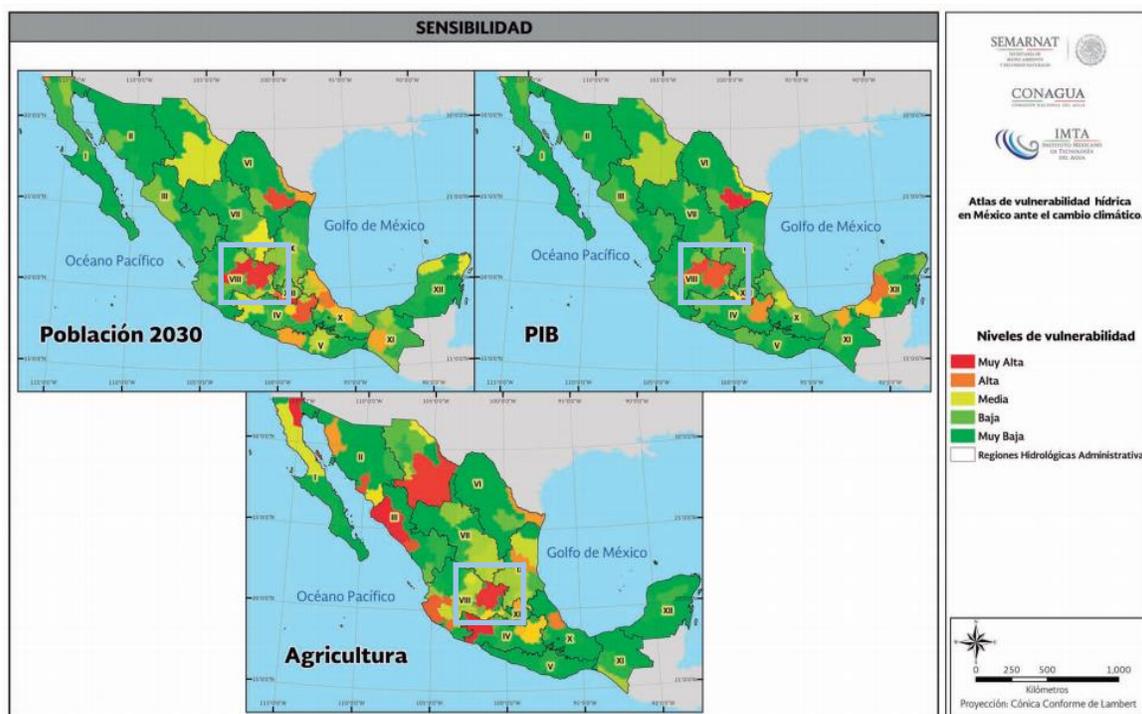


Figura 6. Componentes de sensibilidad hídrica (IMTA, 2016).

Para la capacidad de adaptación tomaron en consideración las características que promueven resiliencia ante condiciones de aridez, es decir, al potencial de adaptarse al estrés impuesto por las sequías. En estos casos los acuíferos representarían la única fuente de suministro para la agricultura. De esta manera, este análisis de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático da como resultado un nivel muy alto para el estado de Guanajuato, donde se ubica el caso de estudio (Figura 8). Las condiciones de presión hídrica pueden agravarse y alterar los procesos asociados al agua de este sistema socioambiental en estudio.

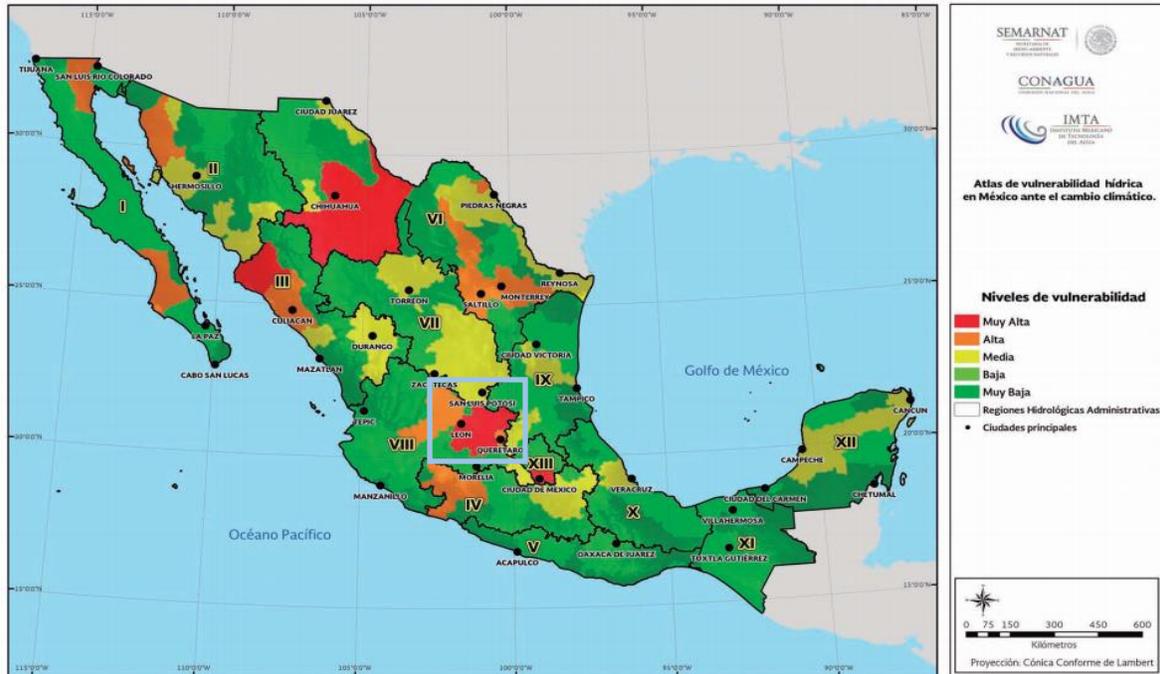


Figura 7. Nivel de vulnerabilidad hídrica global ante el cambio climático para el área de estudio (IMTA, 2016).

Por otra parte, la CONAGUA (2014) publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de los acuíferos, donde se muestra un déficit hídrico para la zona de estudio (Figura 9). Además, también la CONAGUA (2016) ha publicado las disponibilidades de agua para las cuencas hidrológicas y señala como sin disponibilidad a la cuenca de la Independencia (Figura 10).

Lo anterior da cuenta de un alto estrés hídrico para la cuenca de la Independencia contemplando los altos usos de agua por el sector agrícola.



Figura 8. Acuíferos con publicación de disponibilidad en el DOF para el año 2013 (CONAGUA, 2014).

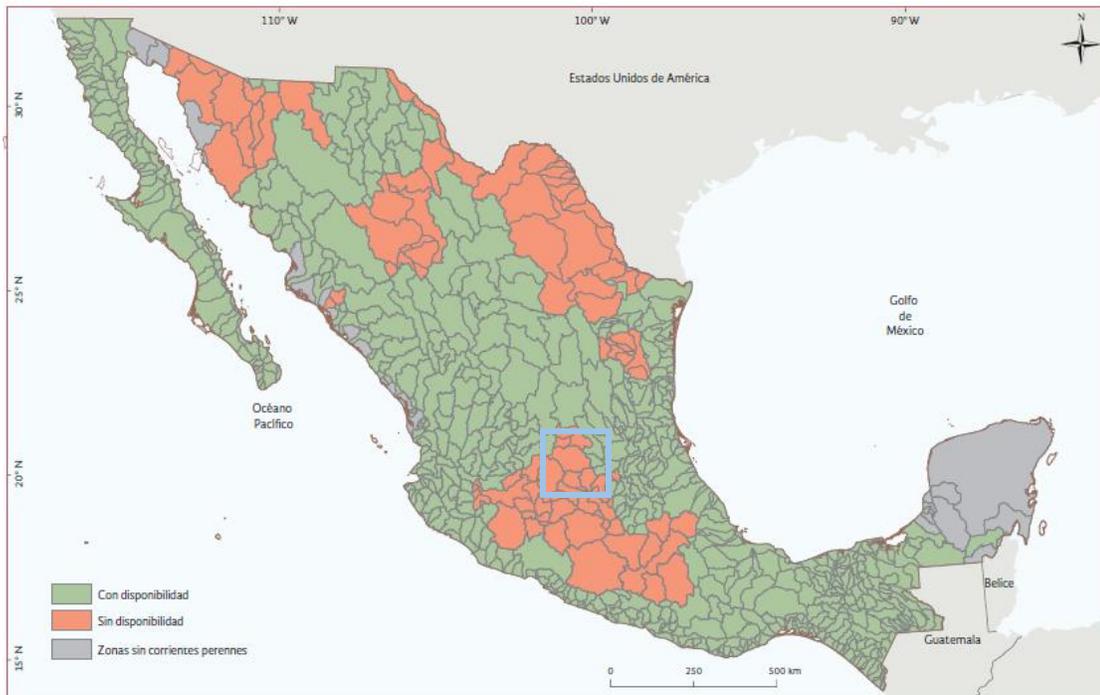


Figura 9. Cuencas hidrológicas con publicación de disponibilidad en el DOF, 2015 (CONAGUA, 2016).

## 5 Marco metodológico

Las distintas problemáticas ambientales han puesto de manifiesto la amplia gama de interconexiones entre las variables de índole biofísica y los factores que involucran las cuestiones humanas. Existe consenso sobre la necesidad de abordar de forma interdisciplinaria los problemas que surgen sobre estas relaciones (Tudela, 1989). La interdisciplina ha sido definida de varias maneras, una de ellas es la siguiente: “interacción propositiva de conocimientos, procesos y conceptos de diferentes campos del conocimiento con perspectivas distintas para ampliar la comprensión, de un problema y su desarrollo cognitivo” (Vickers, 1992). Partiendo de la anterior definición, podemos añadir, que es una actividad generadora de conocimiento que involucra disciplinas académicas que no son comúnmente compatibles, pero que se unen con la intención de lograr conocimiento integral sobre una problemática que suele ser compleja.

Debido a la diversidad de aspectos que pertenecen a distintos órdenes disciplinares y que confluyen en este trabajo, el diseño del método siguió pautas interdisciplinarias, con la intención de lograr la integración de los elementos de análisis. De acuerdo con García (2011), existen aspectos importantes a tomar en cuenta:

a) El objeto de estudio construido como sistema complejo es fuente de una problemática no reducible a la simple adición de fenómenos que pertenecen al dominio exclusivo de una disciplina.

b) Tomar en cuenta los estudios disciplinares pertinentes que corresponden a aquellos aspectos de esa realidad compleja, visualizados desde una disciplina específica. Con el objetivo de llegar a una interpretación sistémica de la problemática original que presenta el

objeto de estudio. A partir de allí, será posible lograr un diagnóstico integrado, que sirva de base para el diseño de acciones que permitan en un futuro influir sobre la evolución del sistema.

Sobre la implementación de un estudio interdisciplinario, Tudela (1989) remarca algunos de los problemas metodológicos en este tipo de estudios:

- a) Problemas de construcción del objeto de estudio, como realidad a la vez biofísica y social: delimitación de un sistema complejo e interacción del sistema con las condiciones de contorno.
- b) Problemas de distinción y articulación de las diversas escalas espaciales y temporales, y de los distintos niveles explicativos de los procesos analizados.
- c) Problemas de caracterización de las condiciones estructurales y funcionales del sistema y la organización de sus elementos.
- d) Problemas de detección de tendencias y cambios en los elementos y sus interrelaciones, así como los procesos de desestructuración.

### **5.1 Construcción del sistema complejo.**

Debido a la heterogeneidad del problema, la alta confluencia de componentes de diversa índole y la interacción de escalas geográficas-temporales variadas; se abordó la construcción del objeto de estudio desde la perspectiva de las ideas de sistemas complejos, como marco analítico para identificar las variables y efectos más relevantes que sirvieron como referente para la elección del índice de vulnerabilidad hídrica, así como para tener un panorama cualitativo que permitiera hacer inferencias sobre los efectos de la globalización económica en la unidad de análisis, las cuales no siempre fueron cuantitativas. Estas situaciones

caracterizadas por la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada, es a lo que se le denomina sistema complejo (García, 1986).

Este recorte de la realidad pone límites al sistema de estudio y, por tanto, requiere del establecimiento de sus condiciones de contorno, es decir, de las interacciones entre el sistema y todo lo que ha quedado afuera, pero que está relacionado con él. A la vez, la definición de los límites del sistema supone una selección de las escalas temporales y espaciales de los fenómenos a estudiar, así como de los elementos que provienen del análisis de las situaciones sociales, económicas y políticas pertinentes. Esta selección no se realizó a priori, fue un proceso de ensayo continuo que se desarrolló a medida que fueron añadiendo elementos pertinentes a la evaluación de la vulnerabilidad hídrica en la cuenca.

Se examinó el sistema de estudio a través de un desglose de éste en áreas específicas prioritarias, como agrupaciones sistémicas de elementos que están estrechamente vinculadas a las mismas, lo que denominamos subsistemas (García, 1988). Por otro lado, la dinámica temporal quedó explícita en el momento en el que se llevó a cabo el análisis, como estado estructural base, al cual se extrajeron los efectos y elemento clave para la incorporación posterior de escenarios futuros de cambio. De esta forma quedó incorporada la dinámica propia del sistema, mediante el análisis sincrónico base de los subsistemas que lo conforman.

La complejidad de un sistema no está solamente determinada por la heterogeneidad de los elementos o subsistemas que lo componen y cuya naturaleza los sitúa normalmente dentro del dominio de diversas ramas del conocimiento. Además de la heterogeneidad, la característica determinante de un sistema complejo es la interdefinibilidad y mutua

dependencia de las funciones que cumplen dichos elementos dentro del sistema total (García, 2011). Esta característica permitió analizar las relaciones entre cada uno de los subsistemas, lo cual fue la base para poder definir los efectos directos o indirectos de la globalización económica en esta unidad de análisis. Ya que, en sistemas complejos toda alteración en un sector se propaga de diversas maneras a través del conjunto de relaciones que definen la estructura del sistema y en situaciones críticas puede generar una reorganización total.

Investigar un sistema complejo significa estudiar un trozo de la realidad que pueden incluir aspectos ambientales, biológicos, sociales, económicos y políticos. Hay varias formas de abordar estos sistemas, sin embargo, no resulta obvio cómo debe definirse con precisión. Por esta razón se plantearon los elementos que lo conforman, los cuales quedaron descritos de acuerdo con la composición propuesta por García (1986).

#### 5.1.1 **Límites.**

Los sistemas complejos presentes en la realidad empírica carecen de límites precisos, tanto en su extensión física, como en su problemática; de aquí la inevitabilidad de establecer o de imponer límites semi-arbitrarios para poder definir el sistema (García, 2006). Esto plantea dos problemas: 1) la definición de los límites reduciendo al mínimo posible la arbitrariedad; 2) la manera de tomar en cuenta las interacciones del sistema, así definido, y la influencia de lo que queda afuera, es decir las condiciones de contorno (García, 2006). Para minimizar la arbitrariedad, se comenzó estableciendo límites por fronteras geográficas, luego por escalas espaciales, que incluyeron, la escala global, nacional, nivel cuenca y localidades. Para luego establecer las interacciones menos obvias, como las formas de producción y de organización económica. Esto es relevante, ya que determinó la

identificación de las condiciones de contorno o condiciones en los límites, las que podemos definir como el conjunto de las interacciones entre niveles que tienen lugar por medio de distintos tipos de influencias, no siempre materiales, designados algunas veces como flujos, que pueden ser de materia, energía, información, políticas, etc. (García, 2013). Las condiciones de contorno pueden llegar a ser determinantes si la velocidad e intensidad de sus efectos es alta, además de determinar en gran medida las posibles estructuras que el sistema pueda adoptar (García, 2008b).

### 5.1.2 Elementos.

La elección de los elementos se determinó por el conjunto de relaciones y aspectos significativos que dieran unidad e identidad a las estructuras, estos elementos fueron los que conformaron los subsistemas. Las relaciones entre estas unidades son fundamentales ya que determinan la estructura y procesos del sistema.

Para la determinación de los elementos se definieron las escalas en dos clases, propuestas por García, 2006:

- a) Escalas de fenómenos. Haciendo una distinción entre los fenómenos que interactúan, pero que tienen dinámica propia, lo cual resultó relevante para determinar la interacción interesalar, principalmente de las dos exposiciones globales, las cuales se conformaron como dos subsistemas que influyen las condiciones de contorno de los subsistemas que se encuentran a nivel de cuenca.
- b) Escalas de tiempo. Son las que determinan los factores de predicción, se tomaron en cuenta los fenómenos con distintas escalas temporales, principalmente los escenarios

futuros de cambio climático, que sirvieron de referencia para las proyecciones de cambio para los cultivos de exportación y datos poblacionales.

### 5.1.3 Estructura.

Desde la perspectiva de los sistemas complejos, la identificación de las propiedades de la estructura en un período dado, determinan la estabilidad o inestabilidad del sistema con respecto a cierto tipo de perturbaciones. La inestabilidad está asociada a los procesos de reestructuración del sistema, así los procesos, y no la estructura misma, constituyen un objetivo fundamental de análisis (García, 2006). Por tanto, el estudio presenta la dinámica del sistema en general y de cada subsistema en distintos periodos temporales. Las estructuras no fueron consideradas como un conjunto de elementos rígidos en condiciones de equilibrio estático (García, 2006), sino como el conjunto de relaciones que se mantiene en condiciones estacionarias, para ciertas escalas, mediante procesos dinámicos de reestructuración

Los procesos de reestructuración, o cambios sustanciales en la estructura, determinan la organización. Las relaciones que determinan la estructura del sistema no se analizaron *a posteriori* de los estudios disciplinarios parciales, sino que se plantearon al inicio de la determinación de los subsistemas y se continuaron replanteando a través del análisis de las interrelaciones entre los subsistemas y las condiciones de contorno. La evolución del sistema procede de una serie de desequilibrios que conducen a sucesivas reorganizaciones, para cada reorganización, el sistema puede permanecer con una estructura en relativo equilibrio dinámico, hasta que una nueva perturbación, desencadene un nuevo desequilibrio (García, 2013), son estas disrupciones las que tuvieron más énfasis en el análisis.

#### 5.1.4 Niveles de procesos.

Los procesos describen los cambios que tienen lugar en el sistema. Los de primer nivel constituyen el efecto local sobre el medio físico o sobre la sociedad que lo habita y lo explota. Los de segundo nivel o metaprocesos, corresponden a procesos generales que determinan los de primer nivel y los del tercer nivel, los procesos macro que afectan los metaprocesos. De acuerdo con García, 2006:

Procesos de primer nivel: cambios producidos en el medio físico, en los métodos de producción, en las condiciones de vida y en el sistema de relaciones socioeconómicas. Fueron los análisis de carácter diagnóstico, que describen la situación y sus tendencias en el nivel fenomenológico inmediato. Incluyeron observaciones, mediciones, análisis previos, de las distintas disciplinas que intervienen en el estudio.

Procesos de segundo nivel: son los que gobiernan o determinan los procesos de primer nivel y, a su vez, pueden estar determinados por los del tercer nivel. Como los cambios tecnológicos, las modificaciones en los modelos productivos.

Procesos de tercer nivel: son los que determinan la dinámica de los metaprocesos, como las políticas nacionales o estatales de desarrollo, modificaciones del mercado internacional, internacionalización de capitales.

El análisis de estos procesos y sus interacciones permitió determinar la dinámica del sistema general, además sirvió para identificar el papel de los distintos elementos y las condiciones de contorno que han inducido reestructuraciones en cada subsistema y a nivel cuenca (García, 1988b).

## **5.2 Métodos aplicados.**

### **5.2.1 Revisión bibliográfica y recorrido general en campo.**

Se realizó una revisión general de textos referentes a la cuenca de la Independencia, para tener estudios de distintas disciplinas que sirvieran de referente para la construcción del sistema complejo general. También se realizó una búsqueda exhaustiva de datos biofísicos sobre la cuenca y el estado de Guanajuato, además de datos de índole social, productiva y económica. Esta fase resultó conveniente para tener un acercamiento general de las condiciones hídricas de la zona. Cuáles eran las magnitudes del problema, así como conocer las apreciaciones más relevantes sobre la cuenca y su condición hídrica.

Se realizaron dos salidas a campo, en dos temporadas distintas, en verano y en invierno de 2016. El recorrido consistió en una aproximación general de las cabeceras municipales que pertenecen a la cuenca, así como de las localidades rurales próximas a los cultivos destinados a la exportación. Hubo una aproximación a los distintos niveles de intensificación de cultivos, tipos de riego y manejo de los pozos de los que se extrae el agua para riego. El otro punto de interés de estos recorridos fue evaluar si existían diferencias significativas con respecto a la intensidad y tipos de cultivos dependiendo de la temporada del año. También se realizó un recorrido sobre los principales cuerpos de agua, el río Laja, las presa Ignacio Allende, en el municipio de San Miguel de Allende; así se constató el nivel de reducción de caudal en el río, y los usos que tiene la presa para el distrito de riego 085-La Begoña.

Esta serie de recorridos también sirvieron para conocer a los afectados por la baja disponibilidad de agua, así como las organizaciones civiles involucradas en la lucha por el agua en la cuenca. El recorrido resultó determinante para dimensionar la magnitud de la

problemática hídrica de una cuenca con alto grado de degradación ambiental y hacer incluso una reformulación de los objetivos del presente trabajo, como parte del proceso de iteración de pasos sugeridos por García (2011), en el desarrollo de un trabajo interdisciplinario.

### 5.2.2 Cálculo de parámetros del balance hídrico en condiciones normales.

Para evaluar los parámetros involucrados en el balance hídrico, se consideró la evapotranspiración potencial ( $ET_o$ ), la cual se calculó de acuerdo al método FAO Penman-Monteith, recomendado como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración potencial (FAO, 2009), según la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a))}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Donde  $ET_o$  representa la evapotranspiración base ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $Rn$  la radiación en la superficie de cultivos ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ),  $G$  flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ),  $T$  la temperatura promedio del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_2$  la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  la saturación de la presión de vapor (kPa),  $e_a$  presión del vapor actual (kPa),  $e_s - e_a$  déficit de la presión del vapor (kPa),  $\Delta$  pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), y  $\gamma$  la constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

El cálculo se realizó con la ayuda del software Cropwat 8.0, el cual requiere datos de localización, altitud, coordenadas (longitud y latitud), temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y horas de luz solar o insolación.

Luego de obtener los valores mensuales de precipitación y  $ET_o$ , las demás variables del balance fueron determinadas, de acuerdo a los siguientes parámetros (en mm): La diferencia

entre precipitación y evapotranspiración ( $PCP - ETo$  [ $\Delta$ ]); la reserva o almacenamiento de agua utilizable  $R(Sto)$ ; el déficit, exceso y variación en la reserva o almacenamiento de agua utilizable (Def, Exc y  $\Delta R$  [ $\Delta Sto$ ], respectivamente); la evapotranspiración actual, el reemplazo (R): y el uso (U).

Se verificó si la  $ETo$  fue mayor o menor que la precipitación (Prec) en el periodo considerado ( $PCP - ETo = \Delta$ ). Esta diferencia clasifica los meses como sigue: meses secos si ( $Prec - ETo < 0$ ) y meses húmedos si ( $Prec - ETo > 0$ ). Para definir la  $R(Sto)$  de agua utilizable, se tomó en consideración lo siguiente: cuando son producidas más entradas que salidas en un mes ( $PCP > ETo$ ), así los excedentes de agua incrementan la reserva de agua del suelo; de lo contrario, si existen más salidas que entradas, las reservas de agua del suelo decrecen.

Para el cálculo se asume que después de un periodo seco, la reserva del suelo es nula (0). Como resultado, el cálculo de R inicia con el primer mes húmedo y el mes previo queda asignado con una reserva nula (0). Luego el siguiente mes R o Sto es calculado añadiendo el valor de R a la  $Prec - ETo = \Delta$  del mes actual de acuerdo a la siguiente ecuación (Ospina *et al.*, 2017):

$$R_i = R_{i-1} + (Prec_i - ETo_i)$$

Si el resultado es mayor que 100, entonces  $R = 100$  y el resto queda transferido al Exc. Si  $R$  está entre 0 y 100, toma ese valor; y si el resultado es menor que 0,  $R = 0$  y el valor se transfiere a Def. La regla está basada en  $R_i$ ; en otras palabras,  $R_i = R_{i-1} + (Prec_i - ETo_i)$  si  $0 < R_{i-1} + (PCP_i - ETo_i) < R_{max}$ ;  $R_i = R_{max}$  si  $R_{i-1} + (PCP_i - ETo_i) > R_{max}$ ; and  $R_i = 0$  si  $0 > R_{i-1} + (PCP_i - ETo_i)$  (Ospina *et al.*, 2017). La variación entre la reserva y el almacenaje

de agua utilizable ( $\Delta R$  o  $\Delta St_o$ ) es calculado basado en los resultados de la diferencia entre el valor de almacenaje de agua utilizable del mes considerado y el último mes; si el signo es positivo, significa que hay reemplazo (R) de la humedad del suelo, y si el valor es negativo, significa que el uso (U) de la humedad del suelo queda como sigue: ( $\Delta R_i = R_i - R_i - I$ ) (Ospina *et al.*, 2017).

### 5.2.3 **Cálculo de los parámetros del balance de agua en condiciones de cambio climático.**

Los valores base de las principales variables climáticas fueron tomados de los datos de salida del modelo de circulación global GFDL-CM3 para el horizonte cercano 2015-2039 (año 2040) con la ruta representativa de concentraciones (RCP) 4.5 Para el horizonte medio se usaron los datos de salida del modelo MPI-ESM-LR 2045-2069 (año 2070) con las rutas representativas de concentraciones (RCP) 8.5. Estos escenarios y periodos se seleccionaron debido a la consistencia de las observaciones preliminares, las cuales mostraron una tasa de cambio en precipitación más acorde con la tendencia de los datos base.

Los datos de salida fueron capas raster con resolución de 30" x 30" del atlas climático generado por la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, disponibles en: [http://atlasclimatico.unam.mx/AECC\\_descargas/](http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/), los cuales son una actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación (Fernández, Zavala, Romero, Conde y Trejo, 2015). La climatología de referencia fue obtenida de la base WorldClim para el periodo 1950-2000, con resolución espacial de 30" x 30", también de la UNIATMOS.

#### 5.2.4 **Cálculo del volumen de escurrimiento natural y disponibilidad media de agua superficial.**

Los escurrimientos superficiales se estimaron con el método del escurrimiento medio (Flores-López *et al.*, 2003) expresado por la relación:

$$V_m = A * C * P_m$$

Donde:  $V_m$  es el volumen medio anual de escurrimiento natural de la cuenca que puede escurrir en millones de  $m^3$ ,  $A$  es el área de la cuenca (en  $km^2$ ),  $C$  es el coeficiente de escurrimiento, con valores adimensionales que varían de 0.1 a 1, y  $P_m$  es la lluvia promedio en la cuenca (en mm).

El coeficiente de escurrimiento fue calculado de acuerdo a lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 (D. O. F., 2015), en función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio, se usaron capas shape del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para clasificar los suelos de la cuenca, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), como se especifica en la tabla 2; al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtuvo el valor del parámetro  $K$ , el cual es un valor en función del tipo y uso de suelo (Tabla 2), que luego fue añadido a una capa raster del SIG.

Cada valor  $K$  fue asignado al área correspondiente en la capa suelo, de acuerdo a los valores presentados según la NOM-011-CONAGUA-2015, para luego ser procesado mediante un sistema de información geográfica (SIG), en el software QGIS 3.0 Madeira.

Tabla 2. *Valores factor K*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características</b>		
<b>A</b>	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
<b>B</b>	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.		
<b>C</b>	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.		

<b>Uso del suelo</b>	<b>Tipo de suelo</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos en hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal, % del suelo cubierto o pastoreo:			
Más del 75% - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Fuente: Modificado de NOM-011-Conagua, (D.O.F, 2015).

Debido a que en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

- Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calculó mediante las fórmulas siguientes (D.O.F., 2015):

Si K resulta menor o igual que 0.15 entonces  $C_e = K (P-250) / 2000$

Si K es mayor que 0.15 entonces  $C_e = K (P-250) / 2000 + (K-0,15) / 1.5$

El coeficiente de escurrimiento promedio en la cuenca se determinó utilizando la media ponderada, expresada por la relación (Flores-López *et al.*, 2003):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * C_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Donde: C es la media ponderada del coeficiente de escurrimiento en la cuenca,  $w_i$  son los ponderadores en función de la superficie ocupada, en relación con el total de la cuenca  $C_i$ .

**4.2** Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca se estimó mediante la siguiente expresión (D. O. F., 2015).

$$\begin{array}{l} \text{Disponibilidad} \\ \text{media anual de agua} \\ \text{superficial en la} \\ \text{cuenca hidrológica} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Volumen medio anual} \\ \text{de escurrimiento de la} \\ \text{cuenca hacia aguas} \\ \text{abajo} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen anual} \\ \text{actual} \\ \text{comprometido} \\ \text{aguas abajo} \end{array}$$

El volumen anual actual comprometido aguas abajo queda determinado como la parte de aguas abajo, necesaria para cumplir con los volúmenes asignados y concesionados por la CONAGUA, limitaciones que se establezcan en las vedas y, si es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, uso ambiental, reglamentos y programación hídrica, es decir, las concesiones registradas en el REPDA (D. O. F., 2015). Estos cálculos también fueron procesados mediante SIG con el software QGIS 3.0 Madeira.

#### 5.2.5 **Vulnerabilidad hídrica y cambio climático.**

Uno de los métodos más usados para evaluar la vulnerabilidad ante el cambio climático ha sido el uso de indicadores e índices, debido a que evalúa un gran número de variables, incorpora la multidimensionalidad y complejidad de la vulnerabilidad, y se puede evaluar la vulnerabilidad a un determinado estresor o sistema impactado (Monterroso, Conde, Gay, Gómez y López, 2012). Además de que pueden ser aplicados en distintas escalas y unidades de análisis con el afán de identificar en un nivel más fino qué o quiénes son más propensos a sufrir un efecto negativo (Monterroso, Conde, Gay, Gómez y López, 2014).

González, *et al.* (2011), formulan una propuesta para la valoración de la vulnerabilidad a nivel cuenca ante el cambio climático. Esta propuesta representa un acercamiento para evaluar la vulnerabilidad ante los cambios de disponibilidad de agua debidos al cambio climático (Montes-Rojas *et al.*, 2011), esta metodología ya había sido aplicada a la zona costera del estado de Tamaulipas.

A continuación, se enlistan y se describen las variables para valorar la vulnerabilidad por disponibilidad de agua en las cuencas hidrológicas, las cuales se agrupan en tres categorías o

clases: el grado de exposición, el grado de susceptibilidad o sensibilidad y la capacidad de adaptación.

#### **5.2.5.1 Grado de Exposición.**

El grado de exposición representa la magnitud y escala de variación del clima al cual se expone un sistema. Implica el grado de exposición al riesgo de sufrir cambios en la disponibilidad de agua debido a la variación de las precipitaciones, consta de tres índices (Tabla 2):

1) Índice de Precipitación ante el Cambio Climático o IPCC.

2) Índice de Escurrimiento Superficial y Subterráneo ante el Cambio Climático, representa la fracción en la cual disminuirá el escurrimiento medio anual en relación con el volumen histórico de escurrimiento.

3) Índice de Disponibilidad de Agua ante el Cambio Climático o IDACC, que determina la fracción en la cual disminuirá la disponibilidad de agua media anual que podrá ser aprovechada (González, *et al.*,2011).

#### **5.2.5.2 Grado de sensibilidad.**

El grado de susceptibilidad o sensibilidad captura el estado sobre el cual habrá algún tipo de impacto debido a la disponibilidad de agua. Es decir, los elementos que promueven la susceptibilidad de afectación el efecto de las variaciones climáticas. Para efecto de esta categoría se usaron tres indicadores:

1) Índice de Consumo de Agua o ICA, representado por el tipo de aplicación o uso del agua (urbano, agrícola, industrial, energía, etc.), identifica y evalúa la presión hídrica priorizando las necesidades del recurso hídrico.

2) Índice de marginación social o IMS, representa el grado de infraestructura urbana que permite enfrentar de mejor manera los efectos adversos del cambio climático.

3) Población expuesta, representada por el número de habitantes susceptibles de verse afectados por estrés hídrico.

### **5.2.5.3 Capacidad de adaptación.**

Esta capacidad que en su conjunto busca representar el grado que tiene la cuenca para hacer frente ante un decremento en la disponibilidad de agua debido al cambio climático. Se consideran tres indicadores:

1) Número de organizaciones no gubernamentales (ONG's) que han tomado acciones referentes al agua, cuestiones ambientales y cambio climático.

2) Índice de reutilización de agua, representa el esfuerzo de sustentabilidad e indica el porcentaje de reutilización del agua (González *et al.*, 2011).

3) Planes o programas gubernamentales concernientes al manejo del agua y cambio climático, ya sean federales, estatales o municipales.

Finalmente:

1) Identificación de las variables previamente descritas.

2) Cálculo de los índices respectivos y normalización (Tabla 3), mediante la fórmula:

$$i = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Donde:  $i$  es el índice normalizado,  $x$  el valor actual,  $x_{min}$  valor mínimo y  $x_{max}$  el valor máximo.

3) Ponderación del índice mediante un proceso de jerarquización analítica (AHP) desarrollado por Saaty (2008).

4) Cálculo de la vulnerabilidad global.

El índice de vulnerabilidad global (IVG) de acuerdo a lo establecido por la fórmula:

$V = [(Exposición + Sensibilidad) - Capacidad de adaptación]$  (Monterroso *et al.*, 2014) queda formulado como sigue:

$$IVG = \left[ \left( \sum_{i=1}^p Ew_i * EI_i \right) + \left( \sum_{i=1}^p Sw_i * SI_i \right) \right] - \left( \sum_{i=1}^p Aw_i * AI_i \right)$$

Dónde:  $EI_i$  son los indicadores de exposición;  $Ew_i$  el peso para cada indicador de exposición;  $p$ , es el número total de indicadores para cada componente;  $SI_i$  son los indicadores de sensibilidad;  $Sw_i$  el peso para cada indicador de sensibilidad;  $AI_i$  son los indicadores de capacidades de adaptación;  $Aw_i$  el peso para cada indicador de vulnerabilidad.

Tabla 3. Componentes del índice de vulnerabilidad global (modificado de González, Haces y Rangel, 2011).

Categoría/Indicador	Elaboración/Fuente
<b>Grado de exposición</b>	
<p>1. <math>IP_{cc}</math>: Índice de Precipitación ante el Cambio Climático</p> $IP_{cc} = 1 - \frac{P_{AE}}{P_{AH}}$	<p><math>P_{AE}</math>: Precipitación Anual Estimada (mm).  <math>P_{AH}</math>: Precipitación Anual Histórica (mm)                      Si <math>IP_{cc} = 0</math> Indica que no hay cambio en la precipitación                      Si <math>IP_{cc} &gt; 0</math> Indica una reducción en la precipitación.</p>
<p>2. <math>IES_{cc}</math>: Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático</p> $IES_{cc} = 1 - \frac{VES_{AE}}{VES_{AH}}$	<p><math>VES_{AE}</math>: Volumen de Escurrimiento Superficial Anual Estimado (Mm<sup>3</sup>).  <math>VES_{AH}</math>: Volumen de Escurrimiento Superficial Anual Histórico (Mm<sup>3</sup>).                      Si <math>IES_{cc} = 0</math> Indica que no hay cambio en el escurrimiento.                      Si <math>IES_{cc} &gt; 0</math> Indica una reducción en el escurrimiento.</p>
<p>3. <math>IDA_{cc}</math>: Índice de Disponibilidad de Agua ante el Cambio Climático</p> $IDA_{cc} = 1 - \frac{D_{AE}}{D_{AH}}$	<p><math>D_{AE}</math>: Disponibilidad Anual Estimada (Mm<sup>3</sup>).  <math>D_{AH}</math>: Disponibilidad Anual Histórica (Mm<sup>3</sup>).                      Si <math>IDA_{cc} = 0</math> Indica que no hay cambio en la disponibilidad.                      Si <math>IDA_{cc} &gt; 0</math> Indica una reducción en la disponibilidad.</p>
<b>Grado de susceptibilidad o sensibilidad</b>	
<p>1. <math>ICA</math>: Índice de Consumo de Agua</p> $ICA = \frac{\sum_i^n C_i}{D}$	<p><math>C</math>: Consumo Anual Histórico (Mm<sup>3</sup>).  <math>i</math>: Tipo de aplicación del recurso (doméstico, industrial, agrícola, etc.).  <math>D</math>: Disponibilidad Anual Histórica (Mm<sup>3</sup>). Representa el porcentaje de recurso consumido.</p>
2. Población expuesta	Cantidad de habitantes en los centros poblacionales localizados dentro de la cuenca, entre mayor población de una localidad mayor la vulnerabilidad ante el cambio climático.
3. $IMS$ : Índice de Marginación Social	Este índice es elaborado por la CONAPO, observa la integración de nueve indicadores socioeconómicos (CONAPO, 2005).
<b>Capacidad de Adaptación</b>	
1. ONG's	Número de ONG's con actividades en los municipios.
<p>2. <math>IRA</math>: Índice de Reutilización de Agua</p> $IRA = \frac{\sum_i^n VAR_i}{VAC}$	<p><math>VAR</math>: Volumen Anual Reutilizado (Mm<sup>3</sup>).  <math>i</math>: Tipo de aplicación del recurso (doméstico, industrial, agrícola, etc.).  <math>VAC</math>: Volumen Anual Consumido (Mm<sup>3</sup>). Representa el porcentaje del recurso reutilizado.</p>
3. Programas	Número de programas gubernamentales municipales, estatales o federales que atienden las cuestiones hídricas o climáticas.

## 6 Análisis de resultados

### 6.1 El sistema complejo

#### 6.1.1 Subsistema hidrológico.

La cuenca de la Independencia tiene una superficie de 7,017 km<sup>2</sup>. Pertenece a la región hidrológico-administrativa Lerma-Santiago-Pacífico, con una red de tributarios, entre los que pueden mencionarse como más importantes el río Arrastres, el San Marcos, el Plan, el Carrizal y el Bocas. La presa Ignacio Allende es la fuente principal de abastecimiento del distrito de riego (DR) 085 - La Begoña, éste se localiza al sur de la cuenca, pero se alimenta principalmente de los aportes del río Laja. Sobre este río se han construido una considerable cantidad de presas de almacenamiento para riego al interior de la cuenca, después de que se construyó la infraestructura del distrito de riego la Begoña.

De acuerdo con datos de Palacios y López (2004), de 1970 al 2000, se construyeron cuatro presas sobre el río o sobre sus afluentes. Estas presas fueron: Álvaro Obregón con capacidad de 12.5 hm<sup>3</sup>, que opera a partir de 1977, San Juan de los Llanos con capacidad de 9 hm<sup>3</sup>, y que inició su funcionamiento a en 1980, Los Reyes con capacidad de 4.63 hm<sup>3</sup>, operando a partir de 1985 y Jesús María con capacidad de 26 hm<sup>3</sup>, que inició operaciones en 1992. La capacidad total de las cuatro presas es de 52.13 hm<sup>3</sup>, los cuales han dejado de escurrir hacia la presa Ignacio Allende; la superficie que pueden regar es de 4,137 hectáreas.

El río la Laja a partir del año de 1970 tuvo una disminución significativa en su escurrimiento, con una tendencia calculada para el período 1970-2000 se indica un valor de -7.42 hm<sup>3</sup>/año, como se observa en la figura 10, posiblemente por la retención de nuevos almacenamientos aguas arriba de la presa Ignacio Allende y las unidades de riego no

registradas, los aportes del río la Laja se concentran en el periodo de lluvias, de junio a octubre, con caudales mínimos para el resto del año (Palacios y López, 2004), como se muestra en la figura 10.

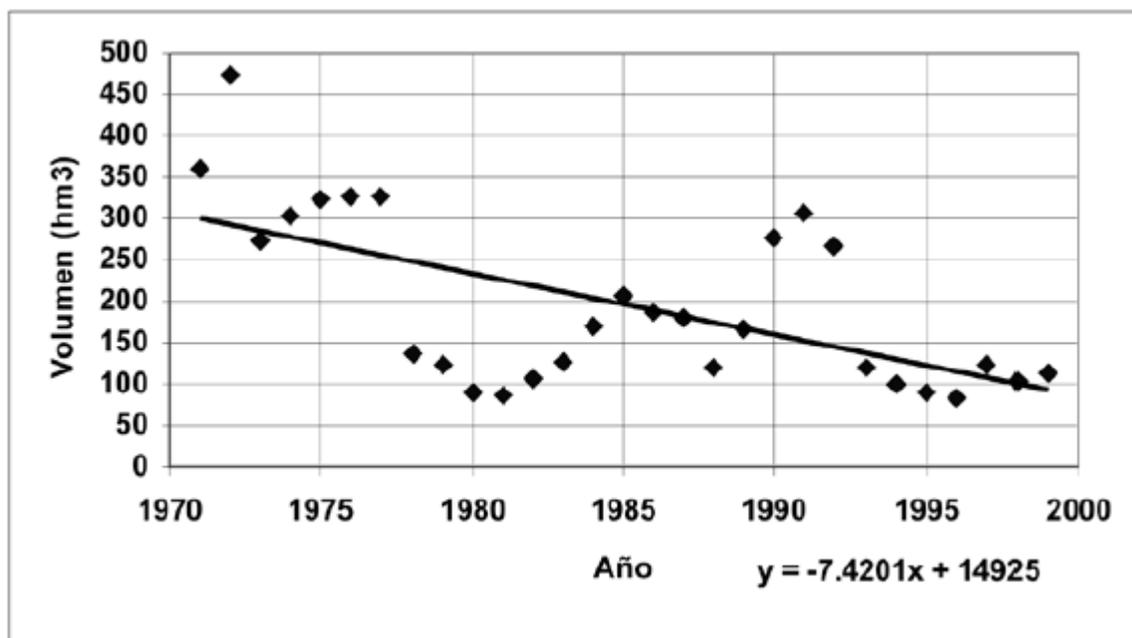


Figura 10. Variación de los aportes del río Laja a la presa Ignacio Allende (Palacios y López, 2004).

En cuanto al agua subterránea existe discrepancia en cuanto a la caracterización de los acuíferos que se encuentran en la cuenca. Ya que los límites suelen ser administrativos, la CONAGUA hace una clasificación que divide al acuífero que corresponde a la cuenca en dos unidades principales: acuífero cuenca alta del Río Laja y acuífero Laguna Seca. El volumen anual de agua subterránea concesionada para el acuífero Cuenca Alta del Río La Laja, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte de 31 de diciembre de 2015 era de 201.8 Mm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2018b) para todos los usos de

agua. La disponibilidad del agua subterránea, de acuerdo al procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana, NOM-011-CNA-2000, queda determinado por la CONAGUA de acuerdo a la fórmula siguiente:

Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica =

(Recarga total media anual) – (Descarga natural comprometida) – (Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA).

La disponibilidad de agua subterránea obtenida al restar al volumen de recarga total media anual, el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA queda como sigue:  $139.7 \text{ Mm}^3 - 0 - 201.8 \text{ Mm}^3 = - 62.1 \text{ Mm}^3$  (CONAGUA, 2018b).

Lo anterior indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad denominada acuífero Cuenca Alta del Río La Laja.

El volumen anual de agua subterránea concesionada para el acuífero Laguna Seca, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el REPDA, a la fecha de corte de 31 de diciembre de 2015 era de  $159.66 \text{ Mm}^3/\text{año}$  (CONAGUA, 2018c). La disponibilidad media anual de agua del subsuelo conforme a la metodología antes indicada, para el acuífero Laguna Seca queda reportada como sigue:

$128,500,000 - 0 - 139,503,232 = -11,003,232 \text{ m}^3$  (CONAGUA, 2018c).

Tampoco existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad administrativa acuífero Laguna Seca.

De acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el REPDA (CONAGUA, 2013), el número de títulos de concesión de agua, abarcan un alto porcentaje para el sector agrícola

(96.31%), seguido del sector público-urbano (2.511%), industrial (0.636%), servicios (0.213%), múltiples (0.141%), pecuario (0.129%) y doméstico (0.058%). En cuanto a la cantidad concesionada, el sector agrícola requiere 302.37 Mm<sup>3</sup>, como se muestra en la figura 12, así como las demás cantidades para los otros sectores, los cuales son mínimos en comparación al sector agrícola, o cual da cuenta del grado de sobreexplotación en la cuenca, por parte de un solo sector de usuarios.

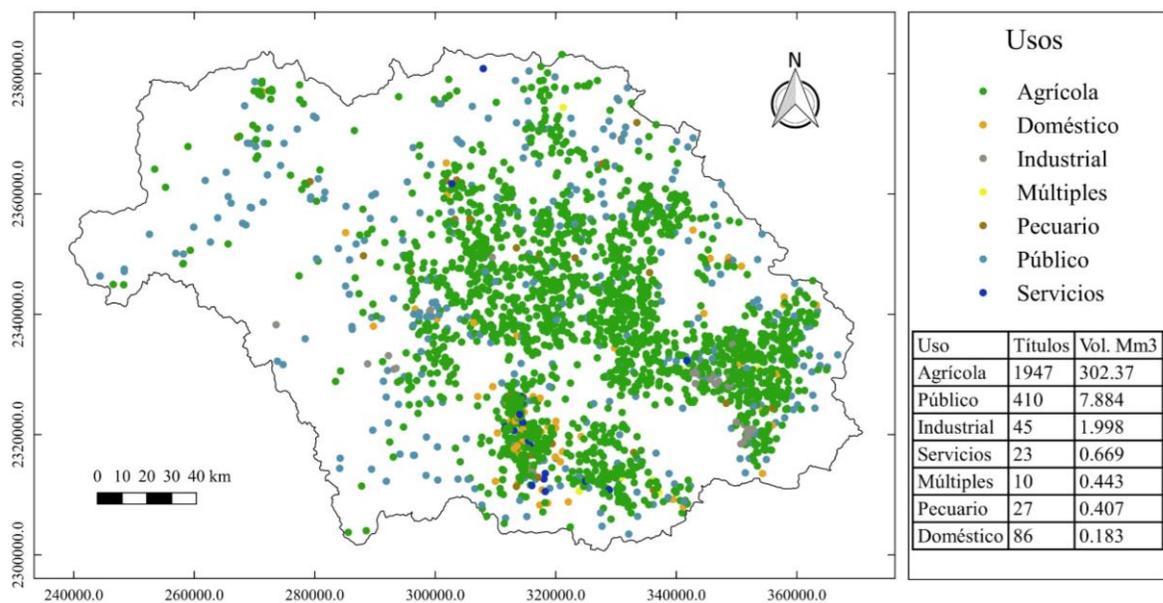


Figura 11. Mapa de usos de agua de acuerdo con el sector. Elaboración propia, datos CONAGUA (2013). Totales en millones de m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>).

El equilibrio entre recarga y descarga, que define una disponibilidad segura del acuífero es del orden de 290 de hm<sup>3</sup>/año (Ortega-Guerrero, 2009), este equilibrio comenzó a romperse a finales de la década de 1960; los primeros pozos en la CI mostraban niveles piezométricos cercanos a 5–10 m de profundidad en la década de 1950 y a partir de entonces aumentó progresivamente la profundidad de los niveles piezométricos que se ubicaban entre 50 y 130

metros para 1998 a más de 200 m en la porción NE de la cuenca en 2008 (Ortega, 2009). El ritmo de descenso del nivel piezométrico se ha incrementado en un rango de 2 a 7 m por año (CNA, 2015a) de acuerdo con la porción de la cuenca donde se encuentre el pozo.

Los datos anteriores dan cuenta de la deficiencia en cuanto a disponibilidad, el agua subterránea está siendo explotada sobremanera, en gran medida debido al alto número de concesiones y usuarios del agua para usos agrícolas, muchos de los cuales carecen de vigilancia, además de que varios aprovechamientos no están registrados y funcionan de manera clandestina. Lo anterior ha generado una serie de sucesos que han llevado a una crisis hídrica en la cuenca de la Independencia. Uno de los factores de esta crisis son las transformaciones en cuanto a las concentraciones minerales y las propiedades químicas de las aguas subterráneas.

Ortega-Guerrero *et al.* (2002), han mostrado la evolución de sodio, RAS (rango de adsorción de sodio), alcalinidad y pH, lo cual es asociado con los productos de reacción de la disolución de mineral feldespático y agua termal en el acuífero fracturado. Esta agua enriquecida en sodio podría estar migrando hacia el acuífero granular, por diferencias de densidad y por el exceso en la extracción de agua en el acuífero granular. Esta variabilidad en los parámetros del agua tiene repercusiones en la degradación del suelo. El sodio en el agua de riego propicia la dispersión de coloides y una vez que entran en contacto con el suelo, desplazan los cationes divalentes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , y ejerce un efecto negativo en la estructura del suelo ya que reduce la conducción de agua y oxígeno a lo largo del perfil, afecta la aireación, aumenta el pH y reduce la disponibilidad de Fe y Zn (Aceves, 1979).

También se han realizado análisis químicos e isotópicos que indican que en el interior y entorno de la zona de abatimiento del acuífero existen altas concentraciones de arsénico inorgánico (iAs) y fluoruro (F-) en un área de influencia de aproximadamente 500 km<sup>2</sup>. Con concentraciones hasta cinco veces por encima de los límites máximos permisibles (LMP), de acuerdo con la norma oficial mexicana, para arsénico; y hasta 10 veces por encima de los LMP para fluoruro. Adicionalmente por la técnica de isótopos de carbono 14 (<sup>13</sup>C/<sup>14</sup>C) se encontraron edades del agua entre 10,000 y 35,000 años (Ortega, 2009).

Estos cambios en las concentraciones de elementos son de especial relevancia, debido a los efectos nocivos en la salud. La exposición al fluoruro, en concentraciones mayores a 1.5 mg/l, se manifiesta en fluorosis dental y esquelética, enfermedades renales y cáncer (WHO, 2004), así como efectos nocivos en el desarrollo del cerebro y reducción del coeficiente intelectual (IQ) de niños en edad escolar (Wang *et al.*, 2007). Mientras que la exposición crónica a concentraciones de iAs en agua mayores a 0.05 mg/l, provoca enfermedades epidérmicas, cardiovasculares, renales, hematológicas y respiratorias (Smedley y Kinniburgh, 2002).

La sobreexplotación del acuífero ya ha tenido efectos adversos en la salud, el exceso de flúor principalmente ha afectado la pigmentación de los dientes, con mayor expresión en niños hasta de 15 años en comunidades ubicadas en la zona de altas concentraciones de iAs y F-. También se detectó la presencia de dos subtipos de agua uno de tipo bicarbonatado-cálcico, que corresponde al acuífero granular, y otra de tipo bicarbonatado-sódico, asociado al acuífero fracturado, (Ortega, 2009), esta subdivisión en perfil vertical del acuífero indica el origen del agua, su composición y profundidades, ya que el acuífero granular es el que cubre al acuífero fracturado. Lo anterior se corresponde con observaciones de agricultores

sobre el exceso de sodio en el suelo, de origen subterráneo e incremento de la temperatura del agua en los pozos de las zonas de abatimiento por bombeo, las cuales llegan hasta los 350 m de profundidad.

La recarga del agua subterránea calculada para 1991 mediante balance hidrológico es de 171 millones de m<sup>3</sup>/año, mientras que la dinámica de los flujos indica que el tiempo promedio de renovabilidad completa para el agua subterránea en la CI es de aproximadamente 6,000 años, lo que convierte al agua subterránea en un recurso vulnerable a su agotamiento, bajo las condiciones semiáridas de la región (Navarro, 2006). Es decir, el sistema hídrico de la cuenca de la Independencia está en condiciones críticas, el tiempo de renovabilidad total es muy alto y, por tanto, es necesario plantearse medidas urgentes para el adecuado uso del agua en un sistema tan sensible a variaciones en precipitación y temperatura.

#### 6.1.2 **Subsistema agroproductivo.**

Este subsistema también ha tenido varias modificaciones en distintos periodos de tiempo, las áreas de cultivo en la CI siguieron un patrón similar a lo acontecido en el bajío de Guanajuato (sureste colindante con Michoacán y Jalisco), con un nivel menor de intensificación inicial, pero con un repunte similar en tiempos modernos (1950-1970). A raíz del reparto agrario en la región (1930-1940), la zona da inicio a una fase de desarrollo caracterizada por la sustitución de cultivos, los cuales estaban diversificados y respondían sólo a las demandas del mercado interno regional. Esta reconversión se da por el fraccionamiento inadecuado de los latifundios hacendarios, los cuales poseían una unidad agrícola, en el sentido de abarcar terrenos planos, pequeñas represas, pozos, terrenos para temporal, así como reservas forestales; es decir, factores que unidos permitían la

funcionalidad del conjunto de las unidades agrícolas (García, 1988). El reparto de los latifundios da como resultado un mayor número de usuarios de las tierras, disminuyeron las tierras de descanso y se creó un mosaico carente de unidad, así los nuevos campesinos se enfrentaron a unidades productivas carentes de algunos de los factores que hacían rentable la producción.

Para hacer frente al inadecuado reparto agrario, se conforman unidades homogéneas tendientes a simplificar la diversidad, conformándose monocultivos principalmente de granos, como el maíz y el trigo. Los ejidatarios que no tuvieron acceso a espacios para sostener la pequeña ganadería campesina quedaron relegados a la compra de forrajes, se modificó la correlación entre tierras de laboreo y tierras de agostadero, y también la estructura entre las tierras de riego y las de temporal (García, 1988), donde los propietarios que tuvieron acceso a agua de riego pudieron expandir los monocultivos que requerían más agua, en este caso el trigo. En la CI no existen distritos de riego, sólo unidades de riego para el uso de agua subterránea, esto no fue limitante hasta que las profundidades fueron aumentando, ya que entre más profundo es el pozo, más costosa es su construcción y operación. Para la época de 1950-1970, inicia en varias regiones del país una etapa de modernización del campo, y el principal impulsor de cambio fue la Revolución Verde, con sus consiguientes repercusiones en el campo mexicano: cambio de la tracción animal por implementos mecanizados, innovación biotecnológica de las variedades vegetales, aplicación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas de síntesis química, así como la sustitución y desplazamiento generalizado de cultivos a gran escala.

La adopción de esta reconversión tecnológica estuvo fuertemente vinculada a las posibilidades de inversión y a partir de la década de 1970, el sector de la propiedad privada

comienza a incrementar sus inversiones en los rubros que permiten la reproducción del nuevo modelo agroproductivo, centrándose en el recurso agua; el 68% del capital invertido correspondía al sector privado, enfocándose a la perforación de pozos e instalación de fuentes de energía (García, 1988).

Otro aspecto importante fue la diferenciación en cuanto a las inversiones en mecanización, donde el sector privado, nuevamente adquiere una ventaja competitiva frente a los sectores sociales incapaces de adquirir maquinaria cada vez más pesada. Esta mecanización responde a las capacidades de trabajo por hectárea según los caballos de fuerza de los motores, lo cual representa parte de las estrategias de las compañías internacionales para vender maquinaria cada vez más pesada, y a las utilidades que representa para los empresarios agrícolas locales por concepto de renta a los campesinos que no podían acceder a ese nivel de tecnificación (García, 1988); algo similar corresponde a los insumos agrícolas, donde las distribuidoras de fertilizantes y pesticidas, también de industrias internacionales, se vuelven proveedoras mayoritariamente de los productores con capacidades adquisitivas para estos rubros, con el consiguiente desplazamiento de quienes no pueden pagar esos productos.

Los productores más adinerados al tener varias ventajas frente a otros grupos van obteniendo más parcelas, como resultado de las ganancias de este modelo productivo, promoviendo que los menos favorecidos, abandonen la tierra, la renten o la vendan. Este patrón de marginación técnica-productiva aumentó con el proceso de concentración de tierras promovido por la inversión en pozos y en el cultivo de granos forrajeros, que inicialmente fue el trigo, para dar paso al sorgo, los cuales se expandieron ampliamente a pesar de ser cultivos con alta demanda de insumos.

Un segundo momento en este patrón de modernización e intensificación del agro en la CI, inicia con la apertura comercial impulsada por el TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte) en 1994, en este tratado comercial se establecen los lineamientos para un libre mercado basado en las reglas de la economía neoliberal. Esta apertura comercial impulsó una nueva reconversión en el sistema agroproductivo, promoviendo la producción de vegetales que tendrían un destino internacional como una forma de transnacionalización de la agricultura regional. El Estado mexicano, a través de las secretarías federales [entre ellas la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGARPA), Secretaría de Economía (SE)] promovió esta nueva reconversión, ampliando los elementos de los paquetes productivos, no sólo con más maquinaria e insumos químicos, sino con nuevas formas de financiamiento, subsidios, riego más tecnificado, membranas plásticas, manejo técnico corporativo, etc.

De las principales agencias que han promovido esta nueva reconfiguración ha sido mediante entidades financieras como el FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido), este es un órgano de financiamiento de la SAGARPA, que promueve la participación e inserción de los productores agropecuarios en las nuevas cadenas productivas y el fomento a los agronegocios; o el FOCIR (Fondo de Capitalización e Inversión Rural) programa perteneciente a este nuevo esquema de financiamiento para el campo mexicano.

El FOCIR es un fondo que busca la capitalización de los sectores agroindustriales, a través del financiamiento de proyectos productivos a mediano y largo que busca la capitalización del sector rural y agroindustrial mediante el fomento de la participación del sector privado y de los agentes financieros nacionales y extranjeros para detonar y potenciar el flujo de recursos. En resumen, ha tenido como objetivos los siguientes (FOCIR, 2017):

- Fomento a la inversión de largo plazo en empresas agroindustriales.
- Creación de vínculos con actores de la industria del capital para generar crecimiento.
- Crear procesos de profesionalización de las empresas de inversión, mediante asistencia técnica sobre gobierno corporativo.
- Fomento a la cultura del capital privado, mediante capacitación promovente de operadores y administradores de fondos de capital.
- Participación directa con inversionistas y empresas en la evaluación e inversión con impacto regional.

Irrumpe el modelo agroindustrial exportador como una nueva reconfiguración del sector agrícola, ya que existen varios incentivos para este tipo de producción y una amplia apertura de recursos financieros que se manifiestan en la construcción de cúmulos agroindustriales (empacadoras, congeladoras, transportadoras) que se encargan del procesado, comercialización y transporte de vegetales frescos, que se sirven de la agricultura por contrato de pequeños productores o de la imbricación de productores medios (200-500 ha) en las cadenas de comercialización y/o servicios de las empresas agroexportadoras. En este punto la intensificación productiva tendiente a la productividad de vegetales para el mercado externo tiene un aumento considerable en las áreas destinadas para esos tipos de cultivos.

Los principales cultivos de exportación en la CI son lechuga, brócoli y espárrago. De acuerdo con los registros del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2017), existe un aumento significativo con una tendencia al alza, lo cual es concordante con las tendencias generales para México.

Este crecimiento ha sido constante y contrasta con el de otros grupos de cultivos, de hecho, la tasa de crecimiento promedio anual para México en el rubro de frutas y vegetales ha sido de 1.8%, significativamente mayor que el correspondiente para cereales (-1.1%) y cultivos industriales (0.1%), aunque debajo de los productos forrajeros (3.2%) (González, 2014). En las siguientes gráficas podemos apreciar estas tendencias en aumento para las áreas de cultivo de brócoli, lechuga y espárrago, así como el valor de la producción (Figura 13 y 14), aunque con tasas de crecimiento mayores, 4.97% anual para las áreas de cultivo para vegetales de exportación (brócoli, lechuga y espárragos).

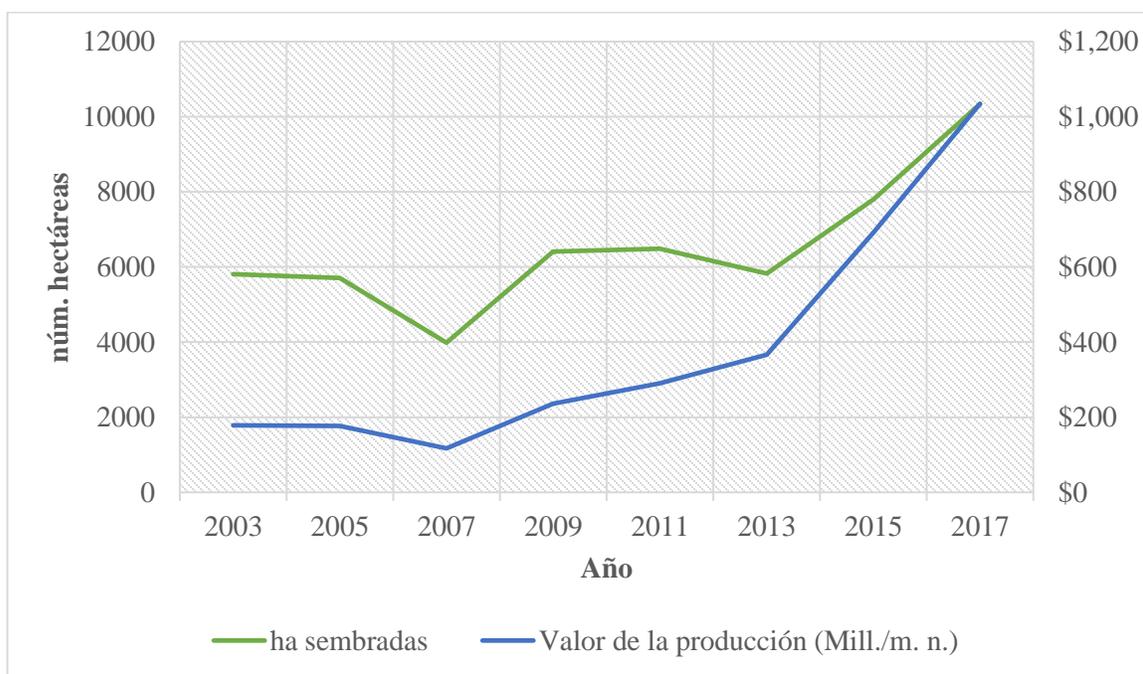
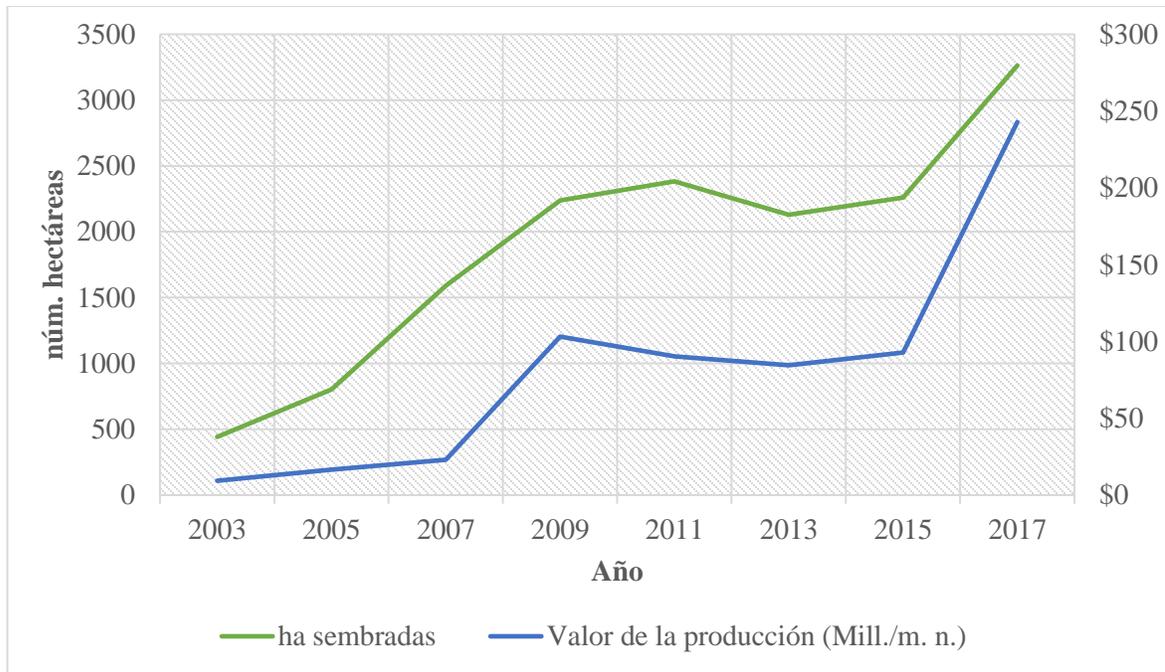


Figura 12. Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de brócoli (2003-2017).



*Figura 13.* Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de lechuga (2003-2017).

En la Figura 15, podemos observar un descenso en las áreas destinadas al cultivo de espárrago, debido posiblemente al recambio por brócoli, el cual ha tenido una mayor importancia. Sin embargo, se observa un repunte desde el año 2015, con una ligera tendencia en aumento, así como aumento en su valor de producción, debido al incremento en el precio por tonelada.

Los gráficos muestran la tendencia en aumento en cuanto a los rendimientos económicos de estos cultivos, los cuales están relacionados con la capacidad y acceso al riego, el cual no es accesible para todos los campesinos y productos (Tabla 4).

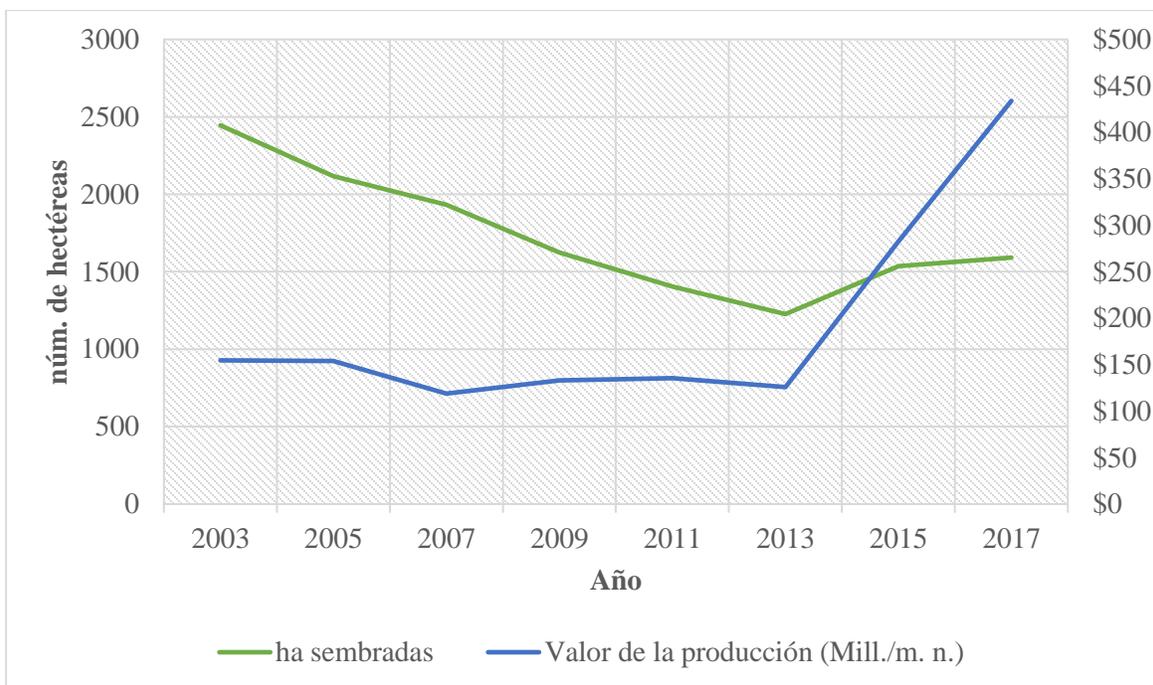


Figura 14.. Número de hectáreas sembradas y valor económico para el cultivo de espárrago (2003-2017).

Tabla 4. Número de hectáreas sembradas y el valor de la producción por tipo de cultivo (2003-2017).

Año	Brócoli		Lechuga		Espárrago	
	núm. has	Valor de la producción	núm. ha	Valor de la producción	núm. ha	Valor de la producción
2003	5811	\$ 178,093,917	442	\$ 9,336,900	2445	\$ 154,670,700
2005	5706	\$ 176,401,316	802	\$ 16,587,150	2117	\$ 154,034,850
2007	3984	\$ 117,079,322	1591	\$ 22,952,415	1933	\$ 118,883,100
2009	6410	\$ 235,708,650	2238	\$ 103,149,400	1625	\$ 133,218,000
2011	6490	\$ 290,614,600	2384	\$ 90,266,550	1405	\$ 135,417,900
2013	5828	\$ 366,669,120	2129	\$ 84,525,636	1226.5	\$ 125,928,244
2015	7796	\$ 691,739,106	2260	\$ 92,832,028	1536	\$ 282,594,581
2017	10338	\$ 1,034,497,910	3263.1	\$ 242,839,946	1590.5	\$ 433,765,757

Elaboración propia con datos de SIAP, 2017.

En la tabla 5, se observa para el año 2017 un total de la producción alrededor de 1700 millones de pesos, con aumentos desde el 2003. Se puede esperar que este tipo de monocultivos sigan aumentando en el futuro cercano, por los altos incentivos económicos que presupone su comercialización, con sus impactos asociados con respecto al uso del agua.

Tabla 5. *Totales de hectáreas sembradas y total del valor de producción (2003-2017).*

<b>Año</b>	<b>Total, has sembradas</b>	<b>Total, valor de la producción</b>
<b>2003</b>	8698	\$ 342,101,517
<b>2005</b>	8625	\$ 347,023,316
<b>2007</b>	7508	\$ 258,914,837
<b>2009</b>	10273	\$ 472,076,050
<b>2011</b>	10279	\$ 516,299,050
<b>2013</b>	9183.5	\$ 577,123,000
<b>2015</b>	11592	\$ 1,067,165,715
<b>2017</b>	<b>15191.6</b>	<b>\$ 1,711,103,613</b>

Elaboración propia, con datos de SIAP, 2017.

A raíz de la intensificación productiva, se promueve un programa de tecnificación del sistema de irrigación en Guanajuato, administrado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, tuvo el cometido de hacer más eficiente el consumo de agua en la agricultura, lo cual está teniendo un efecto contrario al esperado. Al enfatizarse la mejora de la conducción del agua de riego con la misma capacidad de bombeo, los agricultores beneficiados tienen más acceso al agua, pudiendo ampliar las áreas de cultivo (Marañón, 1999). Este programa comenzó a operar en la década de los noventa y consistió en hacer una reconversión paulatina de riego rodado a riego por goteo y por aspersión, mediante la incorporación técnica de diversas tecnologías (cintilla, microtubo, cañones de riego, sistemas de automatización de riego, fertirrigación, etc.). Esta eficiencia en la capacidad de riego

también influye en la capacidad de infiltración, ya que no existen excedentes y todo se maximiza para el uso de agua por cultivo, es decir, existe más de una reasignación del agua, que un verdadero ahorro. Además, la eficiencia de riego por goteo sólo aplica desde una perspectiva de escala muy específica, potencialmente permite usar menos agua para una sola unidad sin comprometer el rendimiento y algunas veces aumentarlo, pero revela poco sobre el potencial de ahorro a nivel de cuenca (Van der Kooij, Zwarteveen, Boesveld y Kuper, 2013).

### 6.1.3 Subsistema sociopolítico.

Las aguas subterráneas son primordiales para la cuenca de la Independencia, todos los sectores dependen de la extracción de agua. Los beneficios de implementar intensivamente la construcción de pozos luego de la revolución verde, tuvo sus beneficios, entre otros motivos porque el agua subterránea se encontraba disponible en el sitio, no requería transporte, no dependía de una gestión centralizada, y ofrecía a los agricultores agua en tiempo oportuno (Wester y Hoogesteger-van Dijk, 2009). Sin embargo, estos beneficios se terminaron una vez que los niveles del acuífero disminuyeron por la sobreexplotación, encareciendo su aprovechamiento y contaminando el acuífero por mineralización. Es entonces que los fugaces beneficios se han convertido en varios impactos negativos.

En este sentido, la vulnerabilidad hídrica se ha expresado de forma diferencial en las distintas unidades de análisis, grupos sociales y espacios geográficos. Ha sido dependiente de las decisiones de distintos sectores y agencias, principalmente de índole estatal. Generando varias alteraciones en los otros subsistemas, en la reorganización del sistema de gobernanza del agua en la cuenca, la población de los municipios que conforman la cuenca,

y la emergencia de nuevas agrupaciones sociales para hacer frente a la crisis hídrica en la cuenca.

La reducción de la calidad y la cantidad de agua en la cuenca de la Independencia, principalmente en lo concerniente a los niveles decrecientes del acuífero, ha conducido a una diferenciación social muy marcada, las localidades que tienen acceso al agua son las favorecidas por la distribución municipal; los agricultores más ricos pueden implementar pozos más profundos y tener bombas con mayor potencia, además de poder tener una vida urbana alejada de las zonas de producción; mientras que los más pobres quedan marginados al no poder comprar la tecnología requerida para los pozos, son los más alejados de los centros de distribución de agua municipal o son los que no pueden acceder a fuentes de agua potable sin contaminantes. Así, se relegan a los agricultores más pobres y a las localidades rurales que no pueden modernizar sus pozos o acceder a otras fuentes de abastecimiento de agua de calidad.

También existen efectos negativos sobre los medios de subsistencia de quienes no logran hacer la transición hacia pozos más profundos con bombas de alta capacidad, obligándolos a volver a la agricultura temporal (en una cuenca con balance hídrico negativo), o forzándolos a migrar hacia los mercados de mano de obra rural, mediante la inserción en las cadenas de trabajo de la agroindustria, en las zonas urbanas de las cabeceras municipales, hacia otros estados, o migración hacia los Estados Unidos (Guanajuato es catalogado con un grado muy alto de intensidad migratoria internacional, ubicándose en la segunda posición a nivel nacional, sólo después de Zacatecas, CONAPO, 2010) con lo que a menudo aumenta la marginación y abandono de tierras de temporal.

Las cadenas económicas para los cultivos de alto valor comercial se han convertido en un incentivo muy fuerte que dificulta establecer un control adecuado sobre las aguas subterráneas (Wester y Hoogesteger-van Dijk, 2009). Existe una exclusión indirecta por parte de los productores ligados a las empresas agroindustriales, ya que adquieren una ventaja competitiva cuando el bombeo es poco rentable y accesible para los pequeños productores. Los productores agrícolas quienes aprovechan el agua subterránea tienen un fuerte incentivo para maximizar la extracción del agua con el objetivo de recuperar su inversión inicial en cuanto a la modernización de los pozos (Shah *et al.*, 2007).

La exclusión va asociada con cambios en la tenencia de la tierra: los productores asociados a las redes comerciales internacionales tienden a acumular tierra por medio de la compra o usufructo (que incluye la concesión del agua) a los pequeños propietarios. Otro factor que complica la adecuada gestión del agua es la difícil organización de los usuarios del acuífero, ya que el incentivo para que los usuarios del acuífero cooperen es limitada (Wester y Hoogesteger-van Dijk, 2009), además de que las asociaciones agrícolas van encaminadas a maximizar los rendimientos en productividad, no se miran como usuarios o gestores hídricos.

La SAGARPA a su vez ha promovido un programa especial de energía para el campo en materia de energía eléctrica de uso agrícola (SAGARPA, 2016), el cual es aplicable a nivel nacional y ha tenido sus repercusiones a nivel cuenca; tiene como objetivo que las personas físicas y morales que utilicen energía eléctrica en el bombeo de agua para uso de riego agrícola, sean beneficiarios de la cuota de energía eléctrica a tarifas de estímulo, con el objetivo de incentivar los procesos primarios de producción. Este estímulo consiste en una tasa preferencial a los costos actuales por concepto de energía eléctrica con una disminución de hasta el 90 % en el pago de energía eléctrica; para acceder a este subsidio es necesario

tener un título de concesión de agua y acreditar la posesión del sistema de bombeo. Con este estímulo, los posibles controles institucionales al uso exacerbado de los sistemas de bombeo se ven restringidos.

La respuesta institucional para resolver la sobreexplotación del acuífero fue la creación de Consejos Técnicos de Aguas (COTAS), como agencias encargadas de la autogestión del agua. El 28 de noviembre de 1997, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural del estado de Guanajuato (SDAyR) constituye formalmente el COTAS de Laguna Seca, como un proceso de “abajo hacia arriba”, donde los usuarios del acuífero tomarían las decisiones e información acerca del uso del agua y desde 1998, la responsabilidad de la formación y supervisión de los COTAS se transfirió de la SDAyR a la CEAG (Comisión Estatal del Agua de Guanajuato) (Wester, Sandoval y Hoogesteger, 2011).

Los COTAS fueron diseñados como organizaciones de usuarios del agua, para lograr acuerdos y proponer alternativas para la gestión integrada del agua, en cada región y así evitar un colapso de las actividades productivas que utilizan el agua como insumo principal (Guerrero, 2000). De esta manera el territorio del estado fue subdividido en 14 regiones con sus respectivos COTAS y un Consejo Estatal Hidráulico (CEH), como la organización suprema de usuarios de agua en el estado, para un total de 15 organizaciones (Guerrero, 2000). Para el territorio de la cuenca de la Independencia, existen tres COTAS, el de Laguna Seca, el de Río Laja y Jaral de Berrios.

Bajo el enfoque de la CNA, los COTAS estaban pensados como organizaciones mixtas de agencias gubernamentales y representantes de usuarios centrados en la gestión de las aguas subterráneas. Teniendo como tareas principales colaborar y asesorar a la CNA en la

formulación de las normas y reglamentos de los acuíferos, sin participación de los COTAS en la toma directa de decisiones ni en el otorgamiento de concesiones de uso de agua; además, el enfoque inicial de la CEAG estuvo marcado por las ideas de institucionalidad de los bienes de uso común de Elinor Ostrom, visión no compartida totalmente por la CNA (Wester, Sandoval y Hoogesteger, 2011). Otra discrepancia importante entre los dos enfoques fue que la CEAG pretendía que los COTAS fueran financiera y administrativamente independientes y que los usuarios de agua lo gestionaran por completo (Guerrero, 2000), lo cual tampoco era compartido por la CNA, lo que ha llevado a una fuerte dependencia financiera estatal, convirtiéndose en una fuente de desacuerdos.

Los COTAS se formaron como asociaciones civiles para garantizar su reconocimiento legal. La organización de los COTAS y el CEH consiste en una junta general como máximo órgano de gobierno, incluidos los representantes de usuarios, luego existe un consejo de gestión de acuerdo con los sectores de usuarios; este consejo es apoyado por un grupo técnico y un grupo asesor, el primero proporciona la información técnica y el grupo asesor apoya en la búsqueda de fondos y ejecución de programas (Guerrero, 2000). Mientras que la junta general actúa como gerente u órgano ejecutor de las resoluciones consensuadas.

La representatividad de usuarios de las aguas subterráneas, en la conformación de los COTAS, fue restringida, en vez de ser una convocatoria amplia, no sólo de todos los sectores de usuarios, sino de toda la sociedad civil que estuviere involucrada o interesada en la problemática del agua en la cuenca. La CEAG no optó por una convocatoria a gran escala, realizó invitaciones a los líderes de organizaciones a participar en el proceso, en la mayoría de los casos, los representantes del sector agrícola eran productores agroindustriales, mientras el sector ejidal campesino fue eludido; los otros sectores fueron el industrial y del

servicio de agua potable, el cual tiene como representantes a los funcionarios municipales (Wester, Sandoval y Hoogesteger, 2011). Esta representatividad heterogénea movió la discusión sobre la sobreexplotación a un asunto de eficiencia en el uso del agua, sin llegar a consensos sólidos sobre las vedas, vigilancia en la extracción, regularización y sanción de pozos sin concesión.

Los intentos por conformar una gestión integral se consolidaron en un programa estatal de agua 2000 - 2006, como una actualización del plan estatal de recursos hídricos. Este programa contemplaba tres ejes principales:

- 1) Comprensión de la hidrogeología del estado.
- 2) Inversión en la eficiencia del uso del agua.
- 3) Aumento de la conciencia e implicación del usuario en la gestión del agua.

La mayoría de estas tareas recayeron en los recién conformados COTAS, en la gestión de la CEAG y la supervisión de la CNA; a pesar de que en Guanajuato existen otras instancias gubernamentales relacionadas directa o indirectamente con la gestión del agua, como el Instituto de Ecología de Guanajuato, la Procuraduría Estatal del Medio Ambiente y los departamentos municipales de agua. Cada una con niveles de contribución a las políticas públicas de diversa índole, como: programas de potabilización o desinfección, control de la calidad del agua, normas técnicas para sistemas de saneamiento, verificación de descargas y evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales (Guerrero, 2000).

Debido al aumento en las tareas, el presupuesto estatal para COTAS se incrementó (Tabla 6) y se estableció un fideicomiso para la participación social del manejo del agua en

Guanajuato (FIPASMA), que apoya financieramente a los COTAS para las áreas de investigación, modelado y monitoreo de aguas subterráneas (CEAG, 2006). Los esfuerzos de la CEAG para fortalecer los COTAS de 2000 a 2006 se centraron en aumentar la participación de los usuarios y formular un modelo de gestión del agua subterránea, mientras que el objetivo era la formulación de normas y reglamentos de uso del acuífero.

Tabla 6. *Financiamiento estatal a los COTAS (modificado de CEAG, 2006).*

<b>Año</b>	<b>Inversión estatal</b>
<b>1988</b>	\$1,504,000
<b>1999</b>	\$4,500,000
<b>2000</b>	\$5,950,000
<b>2001</b>	\$5,000,000
<b>2002</b>	\$7,511,603
<b>2003</b>	\$8,000,000
<b>2004</b>	\$8,000,000
<b>2005</b>	\$8,000,000
<b>2006</b>	\$10,000,000
<b>Total</b>	<b>\$58,465,623</b>

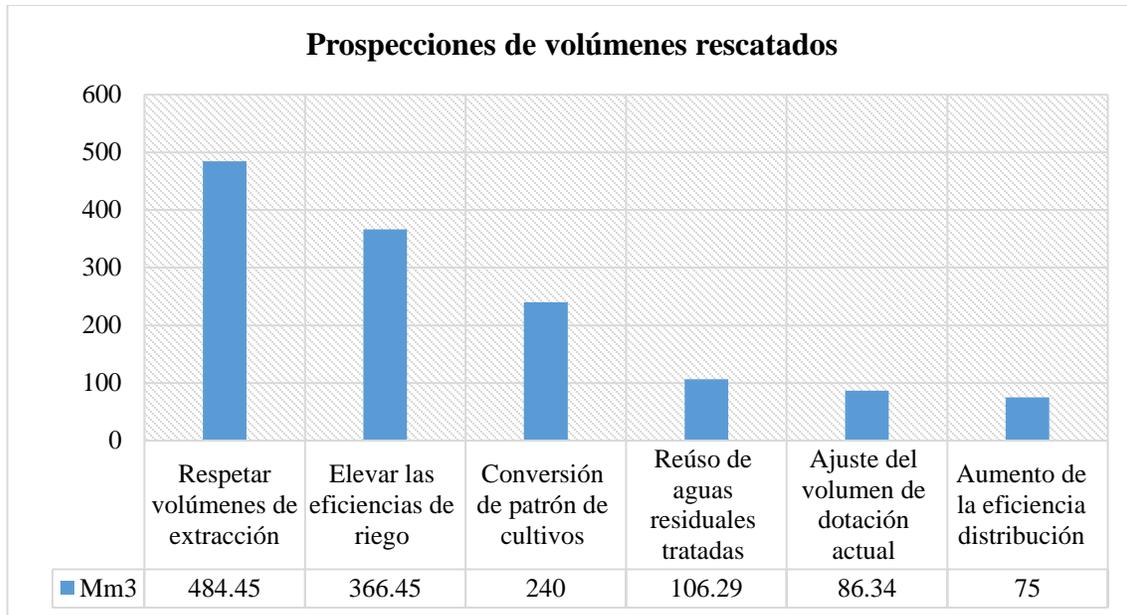
Durante el proceso de integración de usuarios a los COTAS, en 1998, la CEAG identificó más de 15,700 pozos profundos, la mayoría de ellos no registrados por la CONAGUA, a raíz de esto, se establece un plan de regularización de pozos mediante el mismo esquema de concesiones que termina en 2006. De forma paralela se establece una red de monitoreo del agua subterránea que creció a 12 pozos de observación profunda, para lo cual los COTAS recolectan las lecturas de nivel estático dos veces por año (Wester, Sandoval y Hoogesteger, 2011), con el propósito de tener datos sobre el abatimiento de los niveles del acuífero. A

pesar de los pozos no registrados, las actividades de vigilancia y sanción en la extracción aún siguen siendo competencia de la CONAGUA.

En el año 2015 se da a conocer el programa estatal hidráulico de Guanajuato, dirigido por el Estado de Guanajuato y la CONAGUA, en conjunto con el Colegio Mexicano de Especialistas en Recursos Naturales (COLMERN, A. C.) este programa toma como unidades de estudio y gestión a los acuíferos del estado. Este programa marca algunas líneas estratégicas basadas en análisis de balances hídricos de las aguas subterráneas, los cuales marcan déficit hídrico en todas las subdivisiones de acuíferos de la CONAGUA para Guanajuato, excepto el acuífero de Xichú. Los resultados de este programa marcan que el déficit hídrico estatal es mayor, por 484.45 millones de m<sup>3</sup>, en relación con el reportado en el Diario Oficial de la Federación, déficit oficial: -1,060.82 millones de m<sup>3</sup>; déficit calculado: -1,545.27 millones de m<sup>3</sup> (PEHG, 2015). Las líneas estratégicas se componen de propuestas generales para disminuir el déficit hídrico en Guanajuato, con sus respectivas prospecciones de volúmenes recuperados (Figura 15):

- Respetar los volúmenes de extracción concesionados para cada uno de los sectores.
- Elevar las eficiencias de riego mediante la modernización, rehabilitación y/o tecnificación de superficie de riego.
- Conversión de patrón de cultivos.
- Reúso de aguas residuales tratadas (intercambio sectorial).
- Ajuste del volumen de dotación actual al volumen realmente requerido.
- Aumento de la eficiencia de conducción y distribución de agua potable.

- Revisión/Análisis y establecimiento de tarifas competitivas para el uso de agua residual tratada. En su caso aplicación de subsidios para promover su uso.
- Promover campañas de Cultura del Agua y uso de incentivos económicos para la reducción del consumo de agua.



*Figura 15.* Volúmenes rescatados esperados, de acuerdo con las líneas estratégicas del PEHG (Datos PEHG, 2015).

El PEHG se perfila como una continuación del programa estatal de agua 2006. A pesar de ser una buena señal que haya habido continuidad en los trabajos, las propuestas aún no han tenido repercusiones positivas en la cuenca, debido en parte a que las propuestas están basadas en una continuación de inversión financiera y planes de modernización técnica, sin involucrar a los representantes de la sociedad civil y sin atender las causas de fondo. Sin embargo, se establece un esfuerzo por asegurar una tasa cero en cuanto al desbalance hídrico subterráneo. Sería importante delinear los niveles de compromiso institucional de cada una

de las dependencias estatales y federales, así como cuáles serán las atribuciones específicas para cada una de las instancias implicadas, ya que cada una de las líneas estratégicas requiere de capacidades técnicas y administrativas distintas para su implementación. Además de tomar en cuenta los posibles escenarios problemáticos para cada una de las líneas de acción de cada una de las propuestas, ya que pueden llevar a la cuenca a una nueva etapa de reestructuración general. En este sentido, sería factible hacer uso de los resultados favorables que hayan tenido los COTAS en su proceso inicial de conformación, retomar la democratización y representatividad de los integrantes de los COTAS, así como hacer extensivo el otorgamiento de recursos financieros a todos los involucrados.

Las actividades actuales de los COTAS están basadas en los servicios a los usuarios del agua (CEAG, 2018):

- Capacitaciones a los usuarios agrícolas.
- Apoyo para la integración de expedientes en distintos programas institucionales.
- Trámites ante la autoridad del agua.
- Apoyo a usuarios agrícolas para llenado de actas de asamblea ejidal.
- Apoyos a comités rurales de aguas potable: determinación de tarifas y constitución de nuevos comités.
- Acompañamiento y asesoría técnica en operación de sistemas de riego.

Los COTAS han sido poco efectivos para lograr una gestión sostenible del agua. Debido a que sus tareas principales no fueron directivas ni ejecutivas sino más bien consultivas, también porque los mecanismos de representación y solución de conflictos entre los usuarios

están traslapados con las atribuciones de las demás dependencias gubernamentales en términos hídricos. Además, no se produjo una transferencia de la gestión, sino una participación social sin capacidad de decisión ni participación democrática de los integrantes (Marañón, 1999). Por otra parte, la falta de representatividad, autonomía financiera y capacidad de sanción no favorecen una adecuada participación de los implicados y tampoco brinda facultades para una adecuada gestión del agua. A pesar de tales carencias, el proceso que han seguido en su conformación y amplia experiencia de monitoreo, perfilan a estas organizaciones como las unidades sociales de gestión del agua con mayores posibilidades de lograr un adecuado uso de los recursos hídricos.

Cabe recordar que el acuífero de la cuenca de la Independencia se encuentra bajo un esquema de veda para el otorgamiento de nuevas concesiones de agua. Sin embargo, una vez cerrada la regularización de pozos en el REPDA (registro público de derechos de agua) en 2006, las nuevas concesiones en acuíferos sobreexplotados sólo se pueden adquirir a través de transmisiones de concesión. Este esquema se introdujo en 1992, en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y permite la adquisición legal de títulos de concesión por nuevos usuarios que pueden obtener un volumen anual específico de agua subterránea de usuarios preexistentes, este esquema está regulado por la CONAGUA y los artículos 30 y 33 a 37 de la LAN (Hoogesteger y Wester, 2017).

Los títulos de concesión pueden ser transferidos permanentemente a otros usuarios en forma total o parcial. También establece que las transferencias de agua sólo pueden tener lugar dentro de los límites de los sistemas hidrológicos (acuíferos y cuencas hidrográficas definidos y delimitados por la CONAGUA). Los volúmenes de agua transferidos pueden cambiar en su tipo de uso (agrícola, industrial, potable) y puede ser extraído de un pozo en

otra ubicación dentro del acuífero previo consentimiento de la CONAGUA (LAN, 2016). A pesar de que el artículo 33 condiciona el otorgamiento de transferencias o nuevas concesiones que “puedan afectar los derechos de terceros o se puedan alterar o modificar las condiciones hidrológicas o ambientales de las respectivas cuencas o acuíferos” (LAN, 2016), las transferencias de derechos de uso de agua continúan en la cuenca.

Como el agua permanece propiedad de la nación y como tal no puede ser vendido, las transmisiones de derechos de agua son en términos legales gratuitos y sólo implican un arancel administrativo por parte de la CONAGUA (Hoogesteger y Wester, 2017). Sin embargo, en el contexto de un sector agrícola en crecimiento, la demanda de títulos de concesión de agua subterránea es alta, lo que incentiva la creación de mercados informales de derechos de agua en las zonas de veda (Reis, 2014). Dentro del sector agrícola se hace cada vez más importante tener los títulos de concesión regularizados para poder acceder a las subvenciones estatales y cumplir con las crecientes demandas regulatorias de las empresas certificadoras y agroexportadoras (Hoogesteger y Wester, 2017).

En la cuenca, debido al abatimiento de los niveles del acuífero, muchos pozos se secan, lo que ha llevado a que varios usuarios agrícolas accedan a vender la totalidad o parte de su concesión de agua. Quienes primero vendieron fueron pequeños agricultores cuyos pozos se secaron y no tienen posibilidades de reemplazar o profundizar estos (Hoogesteger y Wester, 2017). Estas actividades hacen más pronunciada la diferenciación social con respecto al acceso del agua y permite el aprovechamiento sólo a quienes pueden pagar una concesión o pueden seguir modernizando sus sistemas de bombeo, así se asegura la extracción del agua para el sector agrícola. Estos mercados informales del agua forman parte de los mecanismos

de mercantilización del agua y pueden ser considerados como una consecuencia de la influencia de la globalización económica en esta zona con alta degradación hídrica.

#### 6.1.4 **Interrelaciones causales entre subsistemas y dinámica del sistema**

En la figura 16 se representan los factores fundamentales del análisis del sistema complejo; mientras que las fronteras que engloban a los subsistemas son de dos tipos:

- a) Geográficas: el área que corresponde a la cuenca de la Independencia y los municipios que engloba, San Miguel de Allende, Doctor Mora, Dolores Hidalgo, San Luis de la Paz, San Felipe, San Diego de la Unión y San José Iturbide.
- b) Conceptuales: corresponden a los efectos de dos fenómenos globales en cuanto al uso y disponibilidad del agua; y cómo se relacionan con el aumento de vulnerabilidad hídrica por localidad.

Se hizo énfasis en tres subsistemas y en el análisis de dos exposiciones globales; el subsistema hidrológico (H), sociopolítico (S) y agroproductivo (A). Las exposiciones globalización económica y cambio climático. La división en subsistemas permitió categorizar los elementos más relevantes y concernientes a los aspectos hídricos. Aunque cada uno de los subsistemas tiene su propia dinámica y complejidad inherente, no se requirió delimitar cada uno en sistemas de jerarquía menor. Se consideraron los efectos globales sólo en la esfera de afectación de los elementos tendientes a cambiar la dinámica de los procesos.

Las escalas de los fenómenos fueron de dos tipos:

- a) La escala temporal: cambios en los subsistemas generados por la globalización en las últimas cuatro décadas y los posibles escenarios futuros al año 2040 y 2070.

b) El análisis se enfocó en efectos interescales, global, regional (cuenca) y localidades.

En el estudio de este sistema se asignó la importancia a las interacciones entre el conjunto de subsistemas y lo que queda fuera de las fronteras, es decir, las condiciones de contorno. Se tomaron en cuenta dos condiciones de contorno: nacional y estatal-cuenca, debido principalmente a que las políticas públicas en el nivel nacional permean de forma heterogénea en el nivel estatal o de cuenca, a su vez, el nivel estatal-cuenca influye diferencialmente, a los subsistemas embebidos en la cuenca. Estas condiciones de contorno también sufren los efectos de las exposiciones globales, las cuales, al ser un sistema abierto, se comportan como flujos, que pueden ser de entrada y salida, lo que determina las transformaciones en los subsistemas y las alteraciones de las interrelaciones entre ellos.

Una de las características del análisis del sistema complejo, como lo propone García (1988b), es que permite el estudio diacrónico dependiendo de sus propiedades estructurales, nivel de vulnerabilidad y del conjunto de relaciones entre los subsistemas (Figura 17). A continuación, las relaciones que han surgido como las más relevantes del presente estudio de caso:

Relaciones AH (impacto del subsistema agroproductivo sobre el subsistema hidrológico):

- AH<sub>1</sub>: Descenso del nivel freático del acuífero por las altas tasas de uso de agua.
- AH<sub>2</sub>: Sobreexplotación hídrica ha ocasionado indirectamente contaminación por mineralización.
- AH<sub>3</sub>: Transformación de los caudales hídricos de la cuenca, por infraestructura hídrica.

Relaciones HA (impacto del subsistema hidrológico sobre el subsistema agroproductivo):

- HA<sub>1</sub>: Continua modernización del sistema de riego debido al abatimiento de los pozos.
- HA<sub>2</sub>: Disminución en la disponibilidad de agua subterránea ha aumentado la profundidad y número de pozos.

Relaciones SA (impacto del subsistema sociopolítico en el subsistema agroproductivo):

- SA<sub>1</sub>: Políticas públicas que fomentan los paquetes tecnológicos y la modernización del riego.
- SA<sub>2</sub>: Afectaciones en la disponibilidad de agua mediante asignación diferencial de pozos.
- SA<sub>3</sub>: Subsidios encaminados a la intensificación productiva.

Relaciones AS (impacto del subsistema agroproductivo en el subsistema sociopolítico):

- AS<sub>1</sub>: Mercantilización y privatización del agua.
- AS<sub>2</sub>: Planes y políticas públicas encaminadas al manejo del agua.
- AS<sub>3</sub>: Involucramiento de organizaciones gubernamentales en el manejo del agua.
- AS<sub>4</sub>: Generación de nuevas instituciones y normatividad para la gestión de los recursos hídricos.

Relaciones SH (impacto del subsistema sociopolítico sobre el subsistema hidrológico):

- SH<sub>1</sub>: Aumento de la extracción de agua mediante concesiones de los derechos del agua.
- SH<sub>2</sub>: Construcción de nueva infraestructura de riego.

Relaciones HS (impacto del subsistema hidrológico sobre el subsistema sociopolítico):

- HS<sub>1</sub>: Enfermedades derivadas del consumo de agua fósil.
- HS<sub>2</sub>: Escasez y disminución de la disponibilidad hídrica en diversos asentamientos.
- HS<sub>3</sub>: Nuevas instituciones y normativas para el manejo del agua.

- HS<sub>4</sub>: Intervención de ONG's y políticas públicas ambientales, de manejo de agua, restauración y adaptación al cambio climático.

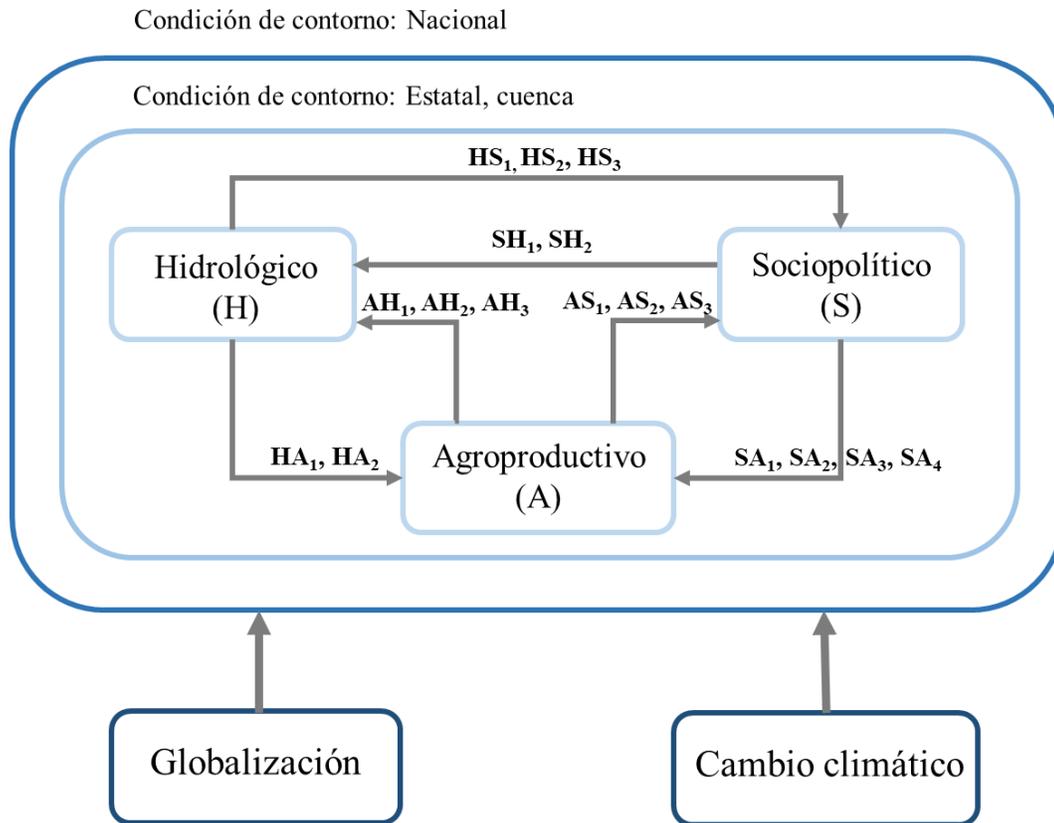


Figura 16. Esquema del sistema complejo, sus subsistemas más relevantes e interacciones.

La dinámica del sistema queda así determinada por los procesos más relevantes:

- a) La intensificación y modernización de los sistemas de riego introdujo un cambio significativo en el sistema agroproductivo que tuvo un impacto en toda la estructura del sistema.
- b) La estructura actual está en condiciones críticas y crea niveles medios-altos de vulnerabilidad hídrica, que potencialmente pueden aumentar por causas del cambio climático, afectando diferencialmente a las localidades expuestas.

Los principales flujos (Figura 18) consecuencia de las exposiciones globales fueron:

a) Flujos de entrada

Globalización:

- GE<sub>1</sub>- Políticas de crédito
- GE<sub>2</sub>- Demanda de productos
- GE<sub>3</sub>- Subsidios
- GE<sub>4</sub>- Modernización tecnológica

Cambio climático:

- CE<sub>1</sub>- Precipitación
- CE<sub>2</sub>- Políticas públicas ambientales
- CE<sub>3</sub>- Intervenciones de ONG'S
- CE<sub>4</sub>- Temperatura

b) Flujos de salida

Globalización:

- GS<sub>1</sub>- Volumen de producción
- GS<sub>2</sub>- Excedentes económicos
- GS<sub>3</sub>- Uso agrícola de agua

Cambio climático:

- CS<sub>1</sub>- Evapotranspiración
- CS<sub>2</sub>- Disminución de escurrimientos

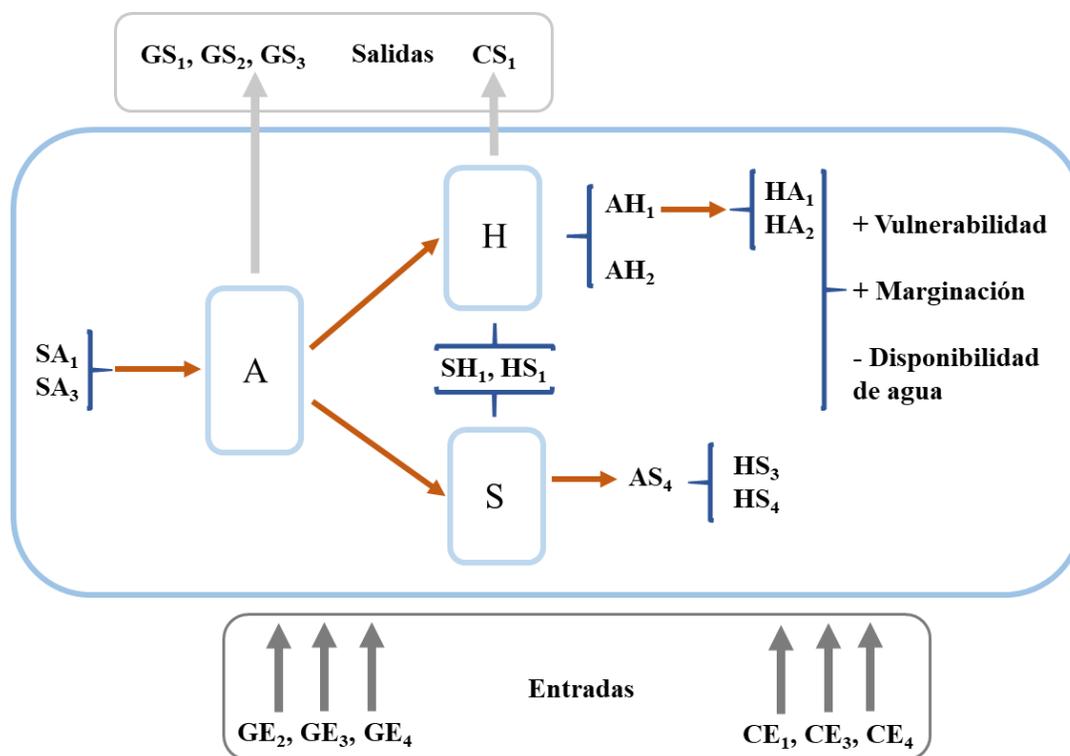


Figura 17. Esquema de la dinámica del sistema complejo.

En síntesis, el sistema se ha comportado y podría desenvolverse de la siguiente manera, asumiendo que las exposiciones globales incidieron en ambas condiciones de contorno, afectando principalmente al subsistema agroproductivo (Figura 18):

- a) La intensificación del riego se produjo mediante el aumento de demanda de productos forrajeros y de hortalizas frescas, congeladas y empaquetadas, ligados a empresas transnacionales.
- b) El fomento mediante subsidios ha incentivado la modernización del riego, propiciando un aumento en el uso del agua por el sector agrícola.
- c) La transformación del subsistema A repercute de forma directa en los otros dos subsistemas.
- d) La influencia de A sobre H se refleja en tres procesos:
  1. Sobreexplotación en aumento del acuífero.
  2. Modernización tecnológica.
  3. Creación de políticas públicas inadecuadas en lo que respecta al manejo del agua.
- e) Los procesos anteriores conducen a otros, como el aumento en la vulnerabilidad hídrica, que es dependiente de los tres subsistemas.
- f) Los procesos hidrológicos se verán alterados por los flujos de entrada y salida por cambio climático, lo cual tendrá efectos de retroalimentación en lo que refiere al uso del agua por los cultivos, a mayor temperatura, más agua de riego; a menor precipitación, menos agua superficial disponible y mayor extracción en el acuífero.

- g) Las sinergias de la globalización y el cambio climático acelerarán los procesos que están fomentando el aumento de vulnerabilidad, por ejemplo, los procesos de marginación y la disminución de la disponibilidad de agua.
- h) Las condiciones de contorno también irán variando y así su nivel de efecto en los subsistemas, actualmente responden a las prerrogativas de la globalización económica y los años que vienen responderán a los nuevos escenarios de cambio climático. Si las modificaciones continúan en el mismo sentido, la estructura actual podría conducir a un cambio general del sistema. Una de las posibilidades, sería la relocalización del subsistema hídrico a un modelo extractivo de las regiones hídricas aledañas, similar al de las grandes urbes con déficit hídrico.

## **6.2 Balance y vulnerabilidad hídricos ante escenarios de cambio climático**

### **6.2.1 Parámetros del balance hídrico en condiciones actuales y ante escenarios de cambio climático**

Los análisis de los parámetros climáticos eran críticos en una zona donde los posibles efectos del cambio climático podrían exacerbar las condiciones de deficiencia hídrica, ya que el suministro natural de agua depende de las fluctuaciones climáticas.

La tabla 7 muestra el comportamiento mensual de las variables de temperatura, precipitación y evaporación. La precipitación se muestra escasa (507 mm), la evapotranspiración de referencia es 1467.5 mm, lo que indica un desbalance hídrico, que explica las condiciones de aridez de la cuenca. Mientras que la temperatura máxima media anual es de 24.9 °C y la media es de 17 °C. Los valores mensuales (línea de base) de las

principales variables climáticas muestran los valores más altos de abril a septiembre, para temperatura, precipitación y evapotranspiración (Figura 18 y 19), lo cual tiene influencia en el suministro natural de agua.

Tabla 7. Valores de referencia mensuales.

V/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom/ Sum
<b>Tmax</b> (°C)	21.4	23.4	25.9	28.0	29.0	27.2	25.6	25.7	24.5	23.8	23.0	21.7	24.9
<b>Tmin</b> (°C)	4.6	5.7	7.8	9.9	11.7	12.4	12.2	12.1	11.8	9.5	6.8	5.4	9.2
<b>Tmed</b> (°C)	13.0	14.5	16.9	18.9	20.3	19.8	18.9	18.9	18.2	16.6	14.9	13.5	17.0
<b>Prec</b> (mm)	14.2	7.5	9.6	18.7	38.3	100.3	103.4	106.7	61.2	25.8	11.0	10.3	507.0
<b>Eto</b> (mm)	76.0	85.1	119.7	138.0	159.0	160.2	163.7	157.2	137.1	114.4	84.3	72.9	1467.5

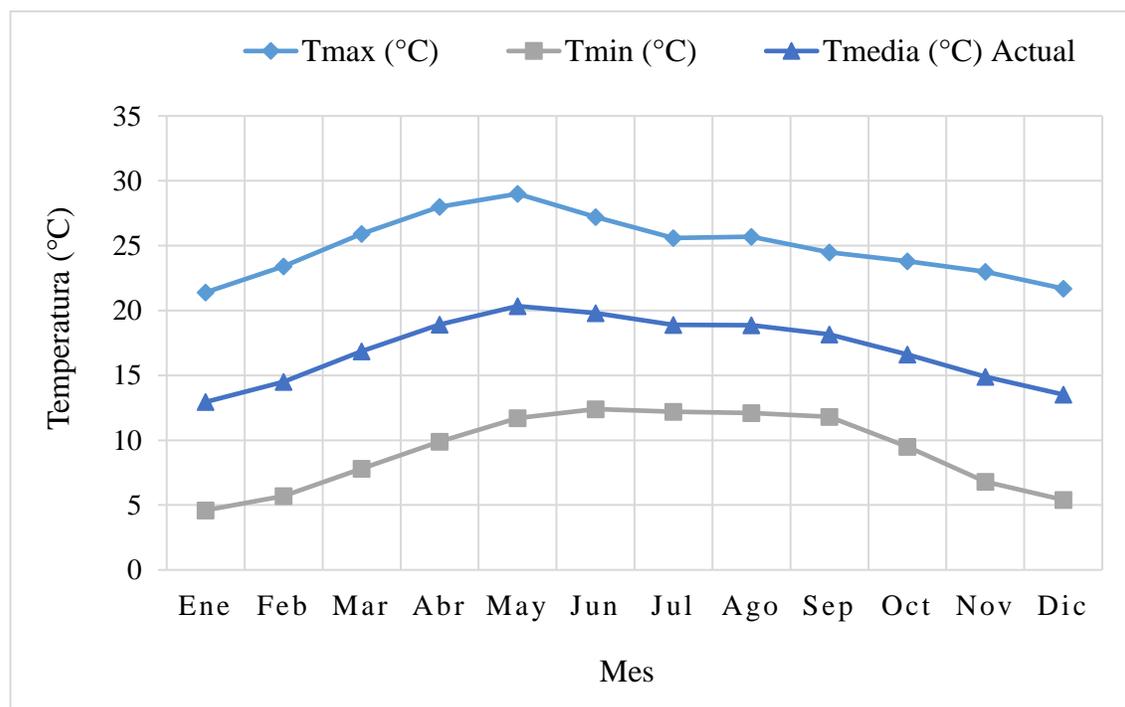


Figura 18. Temperatura mínima, máxima y media, línea base.

En la figura 19 se aprecia que los meses con los valores más altos se encuentran entre marzo y septiembre, es decir la mitad del año, que se comparte con los meses de mayor evapotranspiración (Figura 20), ya que son variables interrelacionadas. Los datos más altos de lluvia son para junio, julio y agosto, con 310.4 mm acumulados, más de la mitad del total anual, alguna variación significativa durante estos meses podría afectar drásticamente la disponibilidad natural de agua para todo el año en que pudiera ocurrir.

En la cuenca se presentan las temperaturas medias más altas en la zona centro-sur entre 20 y 23 °C, en la mayoría de la zona existen temperaturas entre 16 y 18 °C, mientras que las temperaturas más bajas están en la periferia, que corresponden a las zonas con más altitud y con vegetación boscosa, de 13 a 15 °C (Figura 21).

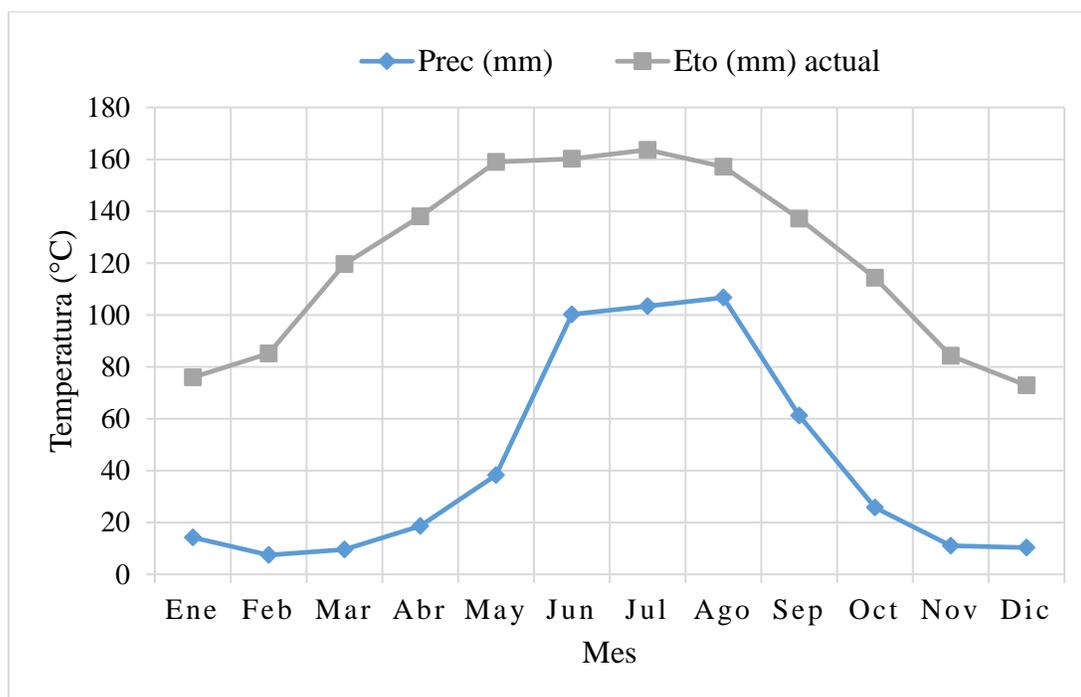


Figura 19. Precipitación y evapotranspiración línea base.

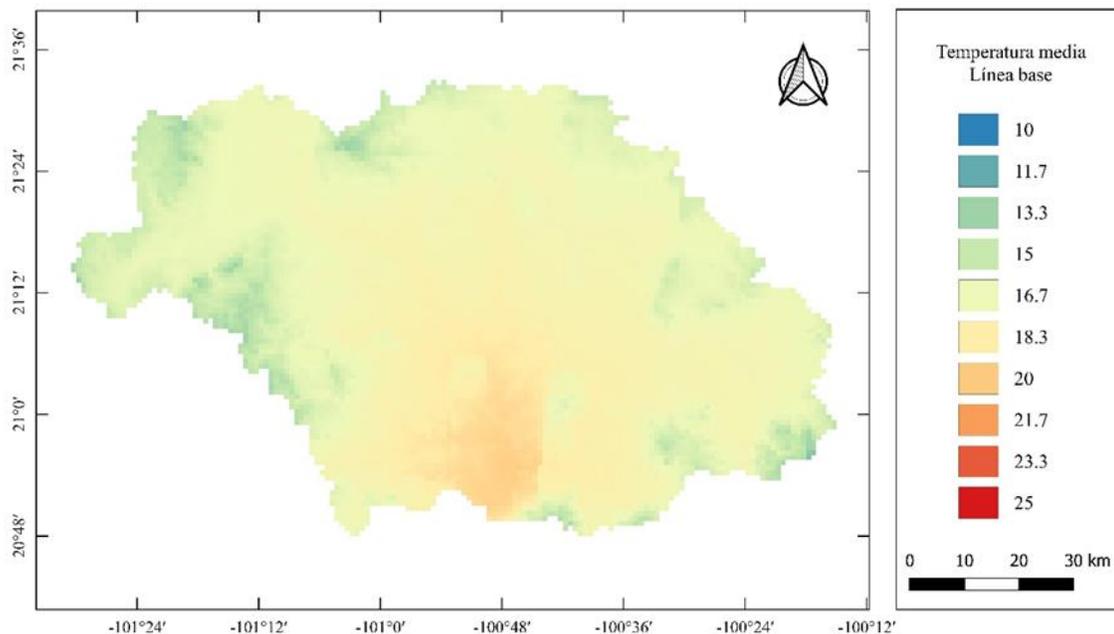


Figura 20. Mapa de la distribución de la temperatura media anual.

Para los datos de salida del modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040 se espera un aumento de temperatura media de 1.7 °C, aumento de la temperatura máxima anual de 2.5 °C, aumento de la temperatura mínima anual de 0.8 °C, una reducción de 91.6 mm de precipitación y un aumento en la evapotranspiración de 60.4 mm, todos estos parámetros relacionados con la disponibilidad de agua (Tabla 8). El periodo con mayor lluvia va de junio a septiembre.

Mientras que para la línea base, no existían meses con precipitación cero, para los datos de salida de este modelo existen dos meses: marzo y diciembre. En cuanto a los meses con temperatura media mayor a 18 °C, para la climatología de referencia son seis meses de abril a septiembre, para este modelo aumenta a ocho, desde marzo a octubre. Similar sucede con la temperatura máxima, en línea base las temperaturas mayores a 25 °C van de marzo a agosto y para este escenario sería de febrero a octubre (Tabla 8).

Tabla 8. Escenario climático futuro modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040 (valores promedio mensuales).

V/ Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom/ Sum
<b>Tmax</b> (°C)	23.4	25.2	28.7	30.6	31.5	30.3	28.4	28.1	27.3	25.9	24.7	24.2	27.4
<b>Tmin</b> (°C)	4.7	5.2	7.9	11.1	13.0	13.6	13.3	13.3	13.1	10.2	8.3	5.7	10.0
<b>Tmed</b> (°C)	14.0	15.2	18.4	20.9	22.3	22.0	21.3	20.8	20.2	18.0	16.4	14.9	18.7
<b>Prec</b> (mm)	6.0	0.4	0.0	7.2	27.4	70.1	99.7	93.2	62.9	30.6	17.9	0.0	415.4
<b>Eto</b> (mm)	79.1	86.8	123.1	142.8	164.9	168.3	171.7	163.7	144.3	119.0	87.9	76.3	1527.9

La distribución espacial de la temperatura media promedio anual para este modelo es mayor para la zona centro-sur, la mayoría muestra valores de 18 a 20 °C, con pequeñas porciones en la periferia que va de los 15 a 16 °C (Figura 22). Difiere de la temperatura media base en el aumento general para toda el área de la cuenca.

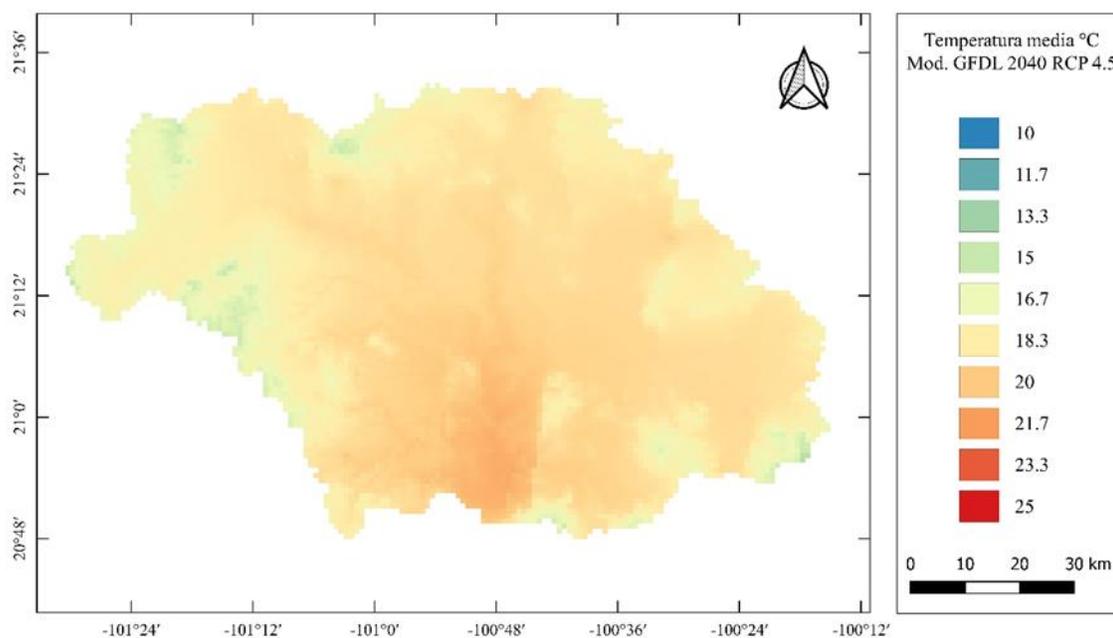


Figura 21. Mapa de distribución de temperatura modelo GFDL-CM3 año 2040 RCP 4.5.

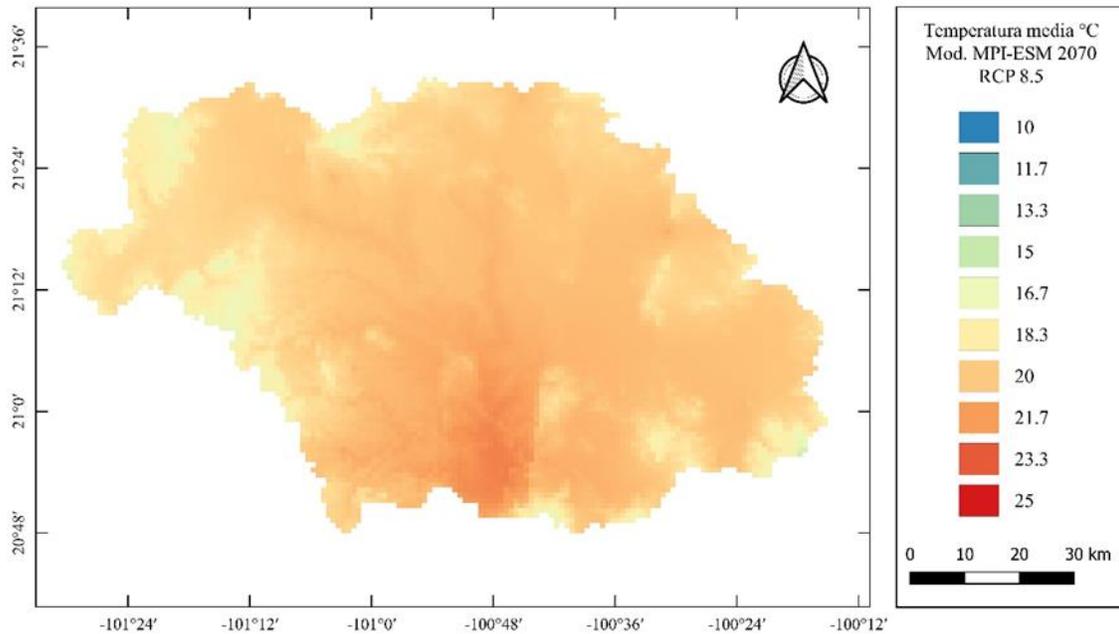


Figura 22. Mapa de distribución de temperatura modelo MPI-ESM-LR año 2070 RCP 8.5.

Los datos de salida del modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070 muestran un aumento de temperatura media anual ( $T_{med}$ ) de 2.9 °C, la temperatura máxima incrementaría 3.1 °C, aumento de temperatura mínima anual ( $T_{min}$ ) de 2.4 °C, disminución de 112.4 mm de lluvia y un aumento de evapotranspiración ( $E_{to}$ ) de 91.7 mm (Tabla 9). Para este escenario también se encuentra un mes con precipitación cero, febrero. Para este modelo el mayor aumento de temperatura se daría en la porción centro-sur de la cuenca (Figura 23).

En cuanto a los meses con temperatura media mayor a 18 °C son de marzo a octubre. Para la temperatura máxima ( $T_{max}$ ), los meses mayores a 25 °C van de febrero a noviembre, un mes más con respecto al modelo GFDL-CM3 (Tabla 9).

Tabla 9. Escenario climático futuro modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

V/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom /Sum
<b>Tmax</b> (°C)	23.8	26.1	28.9	31.4	32.7	30.1	28.6	28.9	27.7	27.0	26.0	24.4	28.0
<b>Tmin</b> (°C)	6.5	7.5	9.9	12.6	14.6	15.3	14.9	14.6	14.1	12.1	9.4	7.5	11.6
<b>Tmed</b> (°C)	15.4	16.9	19.6	22.1	23.8	22.8	21.9	22.0	21.2	19.7	17.8	16.2	19.9
<b>Prec</b> (mm)	5.4	0.0	0.2	4.1	8.4	96.5	76.7	71.7	78.5	35.0	8.0	10.4	394.6
<b>Eto</b> (mm)	80.3	89.3	125.2	145.5	169.3	170.1	174.5	167.7	146.4	122.8	90.6	77.5	1559.2

La precipitación es una variable con disminuciones considerables, si se compara con la línea base, la cual presenta lluvias menos intensas en el centro-norte de la cuenca, entre 300 – 400 mm, y las mayores lluvias al suroeste entre 600 – 800 mm. Las otras zonas con lluvias más abundantes serían para pequeñas áreas en la zona límite de la cuenca, o divisoria de aguas, que se corresponde con algunos reductos de bosque y las zonas altas (Figura 24).

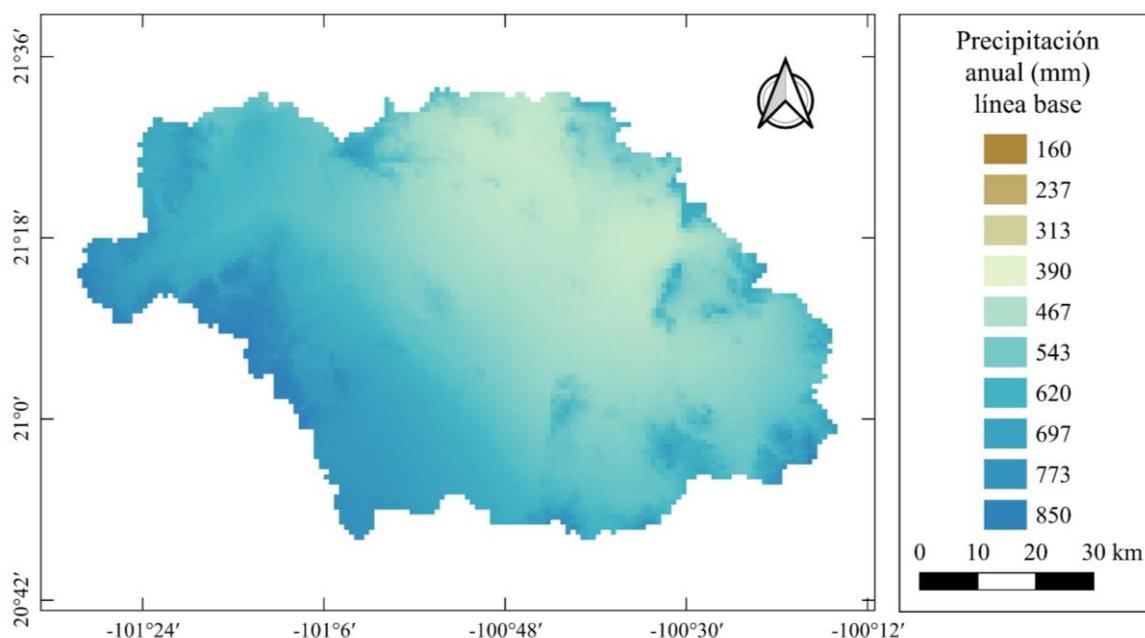


Figura 23. Mapa de distribución de precipitación acumulada anual.

Las principales diferencias entre la precipitación base y los datos de salida del modelo GFDL-CM3 es la marcada disminución en la zona centro-norte y un área considerable de la zona este de la cuenca pasando de los 390 mm, en climatología de referencia, a 160 – 230 mm para el escenario del modelo GFDL-CM3 (Figura 24 y 25).

También es posible apreciar una posible disminución más discreta en las áreas del límite de la cuenca, pasando de 773 mm a 620 mm aproximadamente para el modelo GFDL (Figura 24).

Las cantidades para los dos escenarios futuros en cuanto a la precipitación son menores que la precipitación de referencia. Podría existir una disminución de la precipitación en la parte noroeste de la cuenca de acuerdo con el escenario proyectado por el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5, pasando de 313 mm a 237 mm, con respecto del escenario del modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 (Figuras 25 y 26). Para todo el territorio de la cuenca se pasa de 415.4 mm para el modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 a 394.6 mm para el modelo MPI-ESM-LR.

Para el escenario GFDL-CM3 RCP 4.5 los datos mínimos serían para la pequeña porción central al norte, con posibles lluvias acumuladas de 187 mm y máximas de 667 mm en los márgenes suroeste de la cuenca, con una predominancia de 300 a 400 mm en la parte central y este del territorio. Para el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 la distribución es similar, salvo una posible disminución en los valores, como valor mínimo, en la misma área de la cuenca, se tendrían valores de 167 mm, y valor máximo de 623 mm en la porción suroeste; los valores predominantes van de los 280 mm a 380 mm en la porción central, este y noroeste de la cuenca.

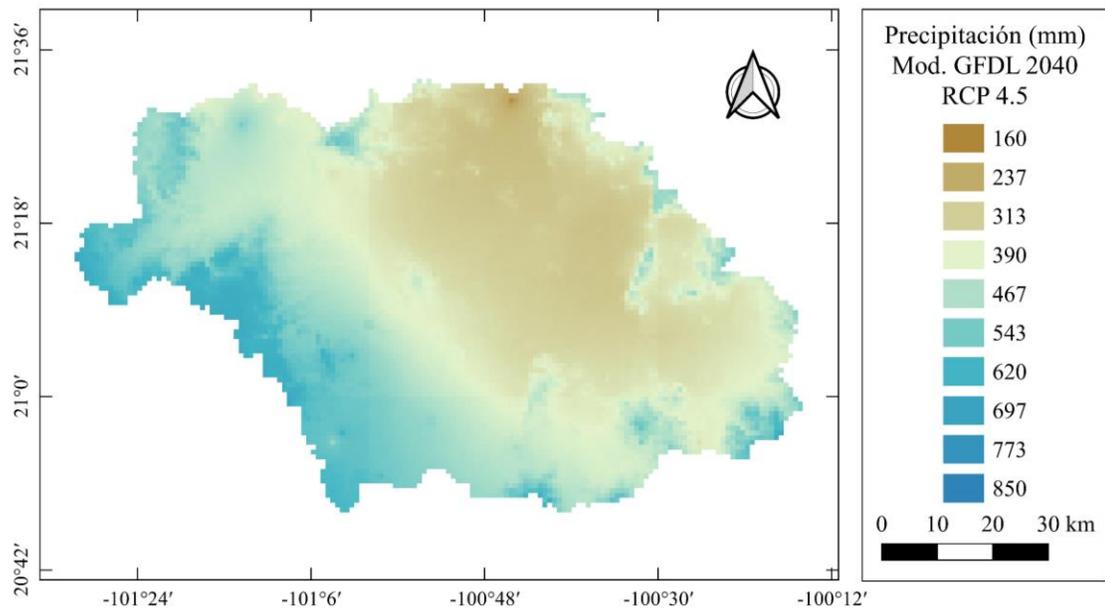


Figura 24. Mapa de distribución de precipitación modelo GFDL-CM3 año 2040 RCP 4.5.

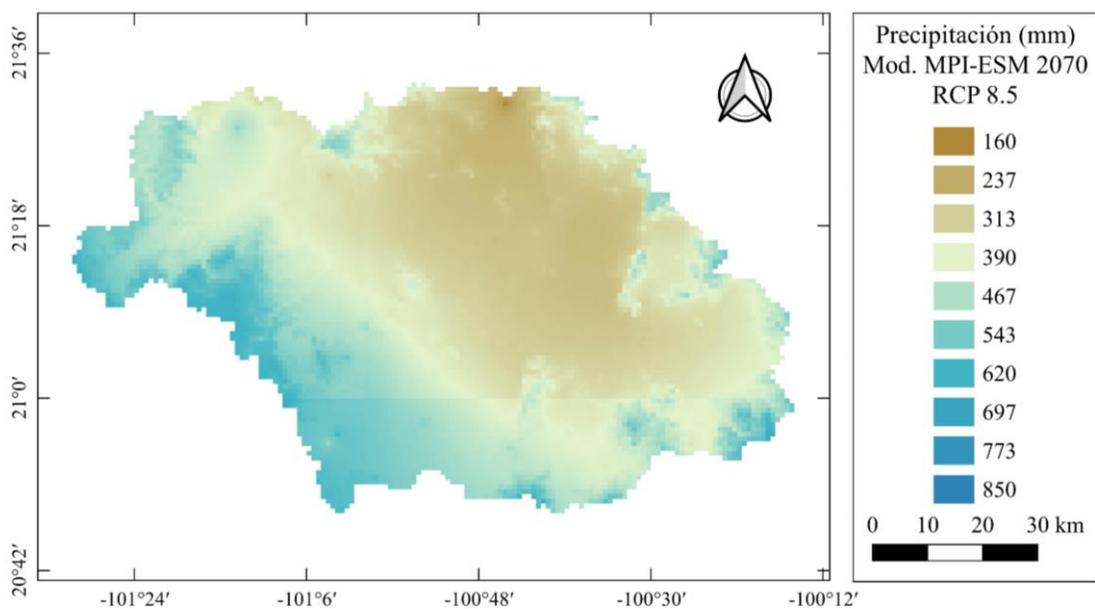


Figura 25. Mapa de distribución de precipitación modelo MPI-ESM-LR año 2070 RCP 8.5.

La temperatura media anual actual es de 17 °C, para el modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 es de 18.7 °C y para el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 es de 19.9 °C. El mes más alto es para mayo, seguido de junio y abril (Figura 27).

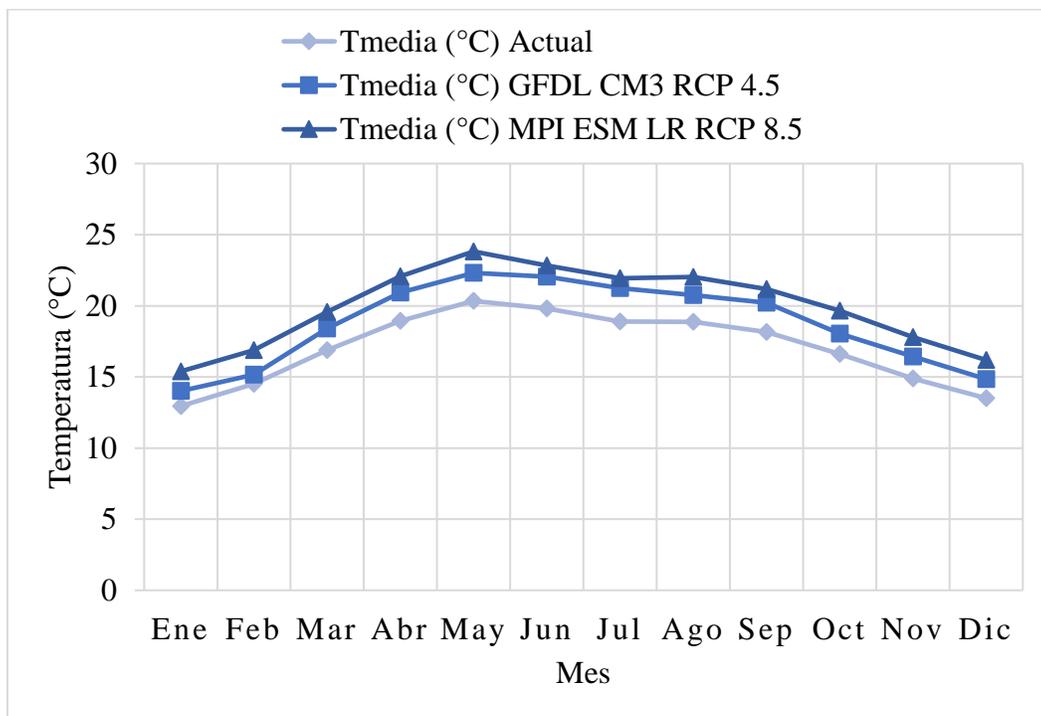


Figura 26. Comparación de temperaturas medias, línea base y escenarios futuros.

La precipitación tiende a disminuir de acuerdo al modelo observado, para la precipitación anual acumulada de referencia son 507 mm, para el modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 es de 415.4 mm y para el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 sería de 394.6 mm. Los meses de lluvias más intensas son junio, julio y agosto, sin embargo, para el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 los meses julio y agosto disminuyen considerablemente en comparación con el otro modelo y la línea base (Figura 28).

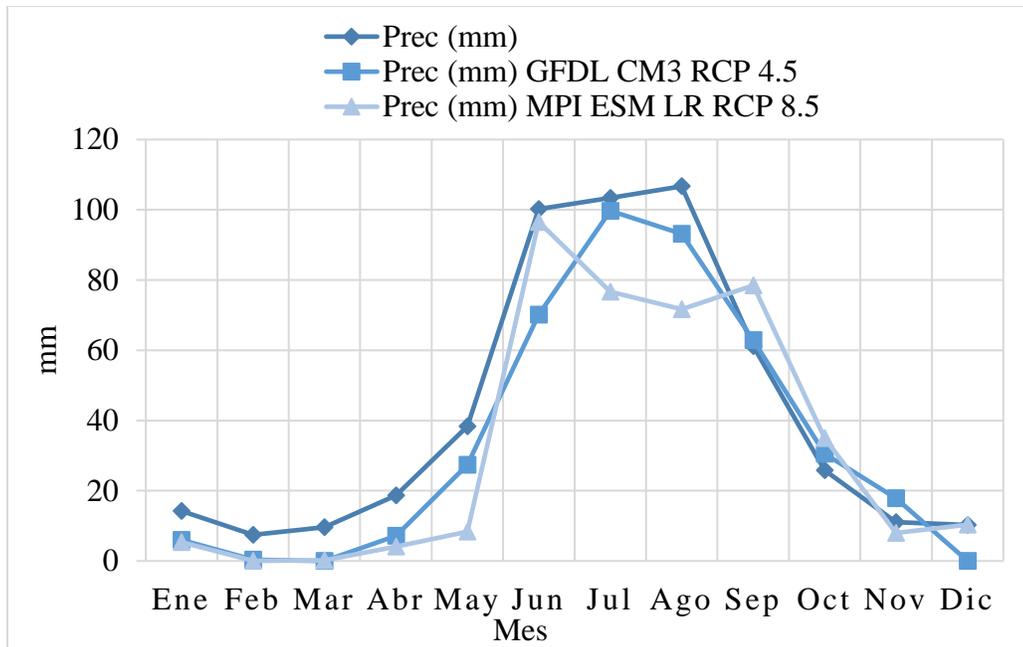


Figura 27. Comparación de precipitación, línea base y escenarios de cambio climático.

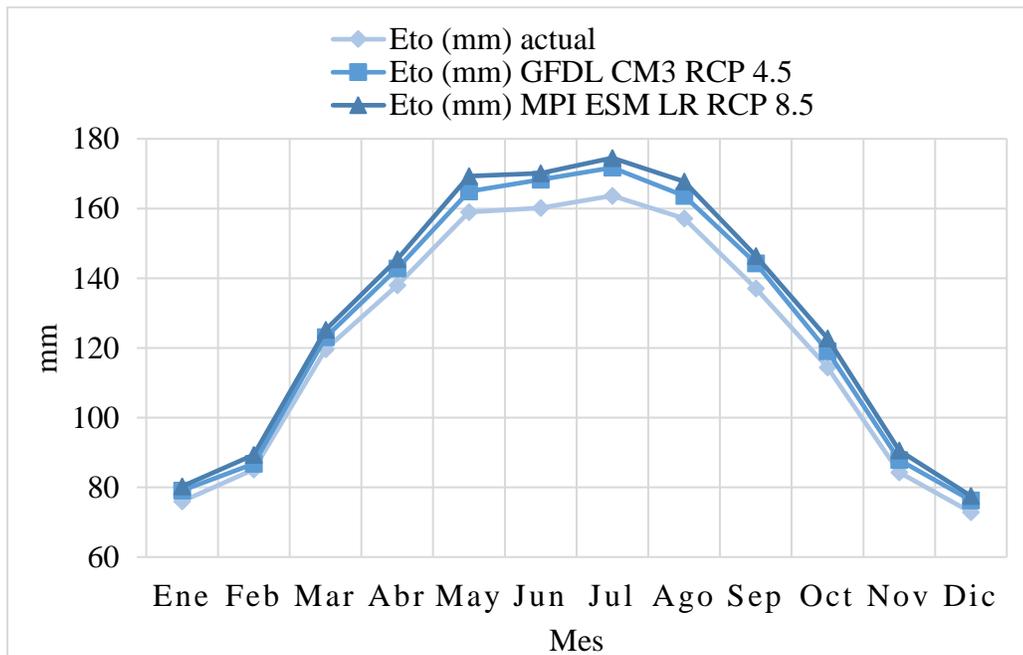


Figura 28. Evapotranspiración de referencia, línea base y escenarios de cambio climático.

### 6.2.2 Balance hídrico en condiciones actuales y de cambio climático

En la tabla 10 se muestran los resultados del balance hídrico para los datos climatológicos de referencia (1950-2000), para la cuenca existe un déficit de 960.5 mm, con cero excedentes. Los déficits (Def) mayores se encuentran en los meses de marzo, abril y mayo, con valores mayores a los 100 mm. En la figura 30, se aprecia que los meses de junio, julio, agosto y septiembre muestran un déficit menor a la precipitación.

Tabla 10. Balance hídrico, línea base.

V/M	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
<b>Prec (mm)</b>	14.2	7.5	9.6	18.7	38.3	100.3	103.4	106.7	61.2	25.8	11.0	10.3	507.0
<b>Eto (mm)</b>	76.0	85.1	119.7	138.0	159.0	160.2	163.7	157.2	137.1	114.4	84.3	72.9	1467.5
<b>Δ</b>	-61.7	-77.7	-110.1	-119.3	-120.7	-60.0	-60.3	-50.5	-75.9	-88.6	-73.3	-62.6	
<b>R Sto</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Def</b>	61.7	77.7	110.1	119.3	120.7	60.0	60.3	50.5	75.9	88.6	73.3	62.6	960.5
<b>Exc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Δ Sto</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
<b>Eta</b>	14.2	7.5	9.6	18.7	38.3	100.3	103.4	106.7	61.2	25.8	11.0	10.3	507.0
<b>Eta/Eto</b>	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.6	0.6	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	3.6

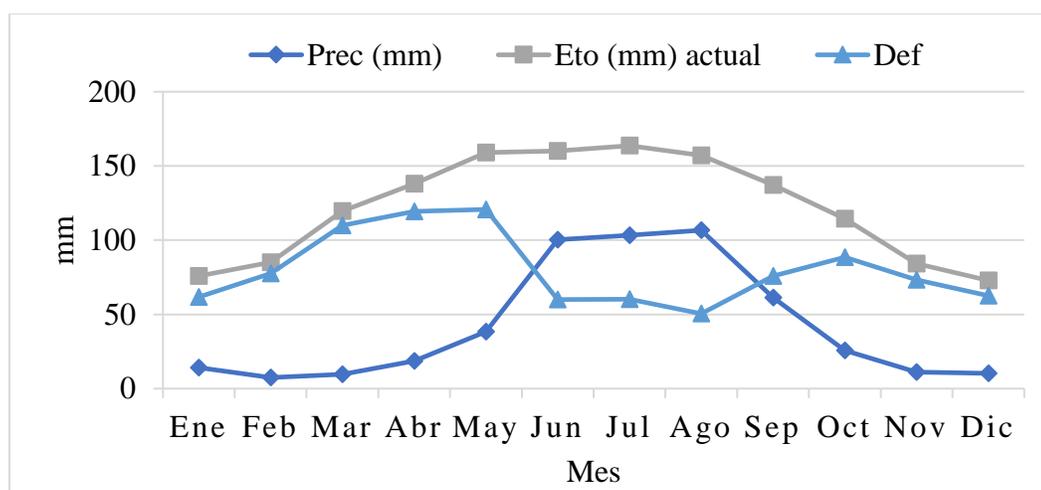


Figura 29. Balance hídrico climatología de referencia.

El balance para el modelo GFDL-CM3 indica una disminución para la precipitación, aumento de la evapotranspiración de referencia (1527 mm) y un déficit anual de 1112.5 mm y cero excedentes (Tabla 11). Los únicos meses con precipitación mayor al déficit, serían julio y agosto, mientras que la precipitación para todos los meses es siempre mayor que la evapotranspiración de referencia (Figura 31).

Tabla 11. Balance hídrico modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040.

V/M	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Prec (mm)	6.0	0.4	0.0	7.2	27.4	70.1	99.7	93.2	62.9	30.6	17.9	0.0	415.4
Eto (mm)	79.1	86.8	123.1	142.8	164.9	168.3	171.7	163.7	144.3	119.0	87.9	76.3	1527.9
$\Delta$	-73.0	-86.5	-123.1	-135.6	-137.5	-98.2	-72.0	-70.5	-81.4	-88.5	-70.0	-76.3	
R Sto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Def	73.0	86.5	123.1	135.6	137.5	98.2	72.0	70.5	81.4	88.5	70.0	76.3	1112.5
Exc	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\Delta$ Sto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Eta	6.0	0.4	0.0	7.2	27.4	70.1	99.7	93.2	62.9	30.6	17.9	0.0	415.4
Eta/Eto	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.6	0.4	0.3	0.2	0.0	0.2

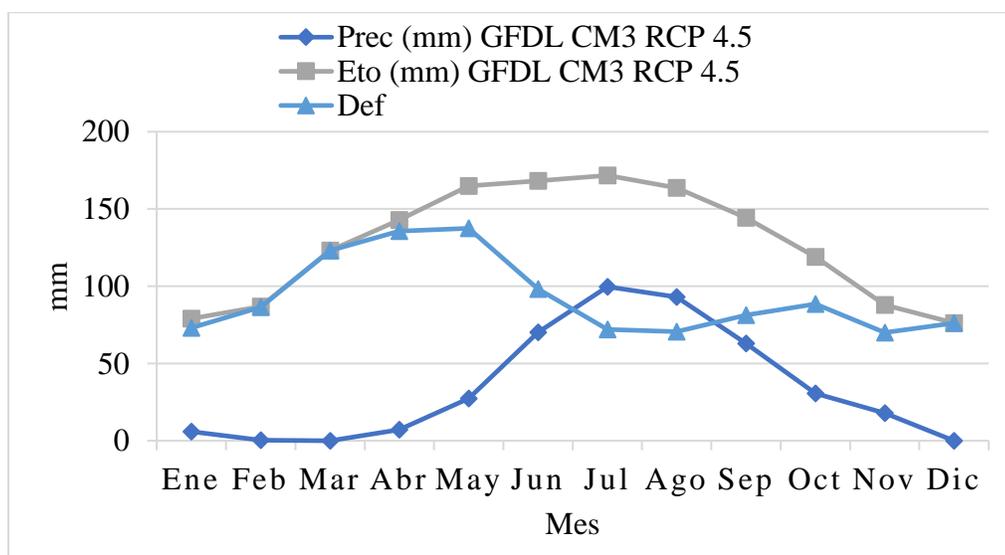


Figura 30. Balance hídrico, modelo GFDL CM3 RCP 4.5 año 2040.

En la tabla 12 se observan los resultados del balance hídrico para el modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5, con un déficit de 1164 mm, con cero excedentes. Los meses con déficits mayores se encuentran en los meses de marzo, abril y mayo, con valores mayores a 120 mm. En la figura 31, se observa que los meses de junio y septiembre muestran un déficit menor a la precipitación, y al igual que en los balances anteriores, la evapotranspiración de referencia siempre es mayor que la precipitación.

Tabla 12. Balance hídrico escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

V/M	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
<b>Prec (mm)</b>	5.4	0.0	0.2	4.1	8.4	96.5	76.7	71.7	78.5	35.0	8.0	10.4	394.6
<b>Eto (mm)</b>	80.3	89.3	125.2	145.5	169.3	170.1	174.5	167.7	146.4	122.8	90.6	77.5	1559.2
<b>Δ</b>	-74.9	-89.3	-125.1	-141.4	-160.9	-73.6	-97.9	-96.0	-67.9	-87.8	-82.7	-67.2	
<b>R Sto</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Def</b>	74.9	89.3	125.1	141.4	160.9	73.6	97.9	96.0	67.9	87.8	82.7	67.2	1164.6
<b>Exc</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Δ Sto</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>Eta</b>	5.4	0.0	0.2	4.1	8.4	96.5	76.7	71.7	78.5	35.0	8.0	10.4	394.6
<b>Eta/Eto</b>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4	0.4	0.5	0.3	0.1	0.1	0.2

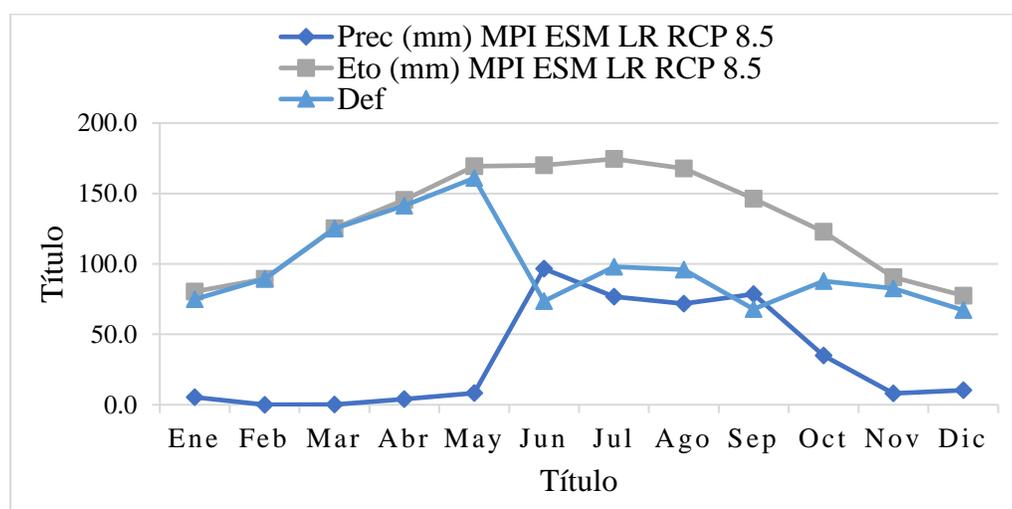


Figura 31. Balance hídrico modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

En la tabla 13 se muestran los porcentajes de cambio de los dos escenarios con respecto a la climatología base. Para precipitación (prec), evapotranspiración de referencia (Eto) y déficit (Def) los porcentajes de cambio se presentan para los dos escenarios, con valores mayores de cambio para el modelo MPI-ESM-LR.

Existe una posible disminución de precipitación en 18.07 % para el modelo GFDL-CM3 y de 22.17 % para el modelo MPI-ESM-LR, aumento de la evapotranspiración de 4.12 % y 6.25 % respectivamente y aumento del déficit por 15.83 % y 21.25 %. El excedente es nulo para la línea base, al igual que para los dos escenarios.

Tabla 13. *Cambio esperado en el balance hídrico.*

Variable (mm)	Línea base	GFDL-CM3 2040		MPI-ESM-LR 2070	
		RCP 4.5	% Cambio	RCP 8.5	% Cambio
<b>Prec</b>	507	415.4	18.07	394.6	22.17
<b>Eto</b>	1467.5	1527.9	4.12	1559.2	6.25
<b>Def</b>	960.5	1112.5	15.83	1164.6	21.25
<b>Exc</b>	0	0	0	0	0

El parámetro más importante, la precipitación, es el que tiene un porcentaje mayor de cambio. Esto influye de manera directa en el aumento al déficit, al escurrimiento natural y finalmente en la disponibilidad de agua, como veremos en el siguiente apartado.

### 6.2.3 **Escorrentimiento natural actual y proyección futura ante escenarios de cambio climático**

Los volúmenes de escorrentimiento natural de la cuenca presentan valores entre 171.03 Mm<sup>3</sup> a 0.25 Mm<sup>3</sup>, con un valor acumulado para toda la cuenca de 44.48 Mm<sup>3</sup>. Los valores más altos se presentan en la zona suroeste de la cuenca, mientras que los valores más bajos al centro y este (Figura 33). Los escorrentimientos naturales se presentan de forma heterogénea, ya que son dependientes no sólo de la lluvia, sino también de los tipos y usos del suelo.

A pesar de ser una zona semiárida, los escorrentimientos siguen presentándose y aún permiten que existan afluentes que siguen alimentando los distintos cuerpos de agua, represas, ollas de captación y principalmente la presa Allende, ubicada al sur de la cuenca. Sin embargo, los datos de salida para los dos modelos indican una posible reducción de los escorrentimientos naturales, que se irá presentando de forma subsecuente hasta el año 2040.

El escorrentimiento total de la cuenca es indispensable para lograr estabilizar las condiciones de estrés hídrico, ya no es posible sobrepasar el uso de estos volúmenes y es necesario reducirlos, debido a la muy posible reducción del escorrentimiento natural en el horizonte cercano.

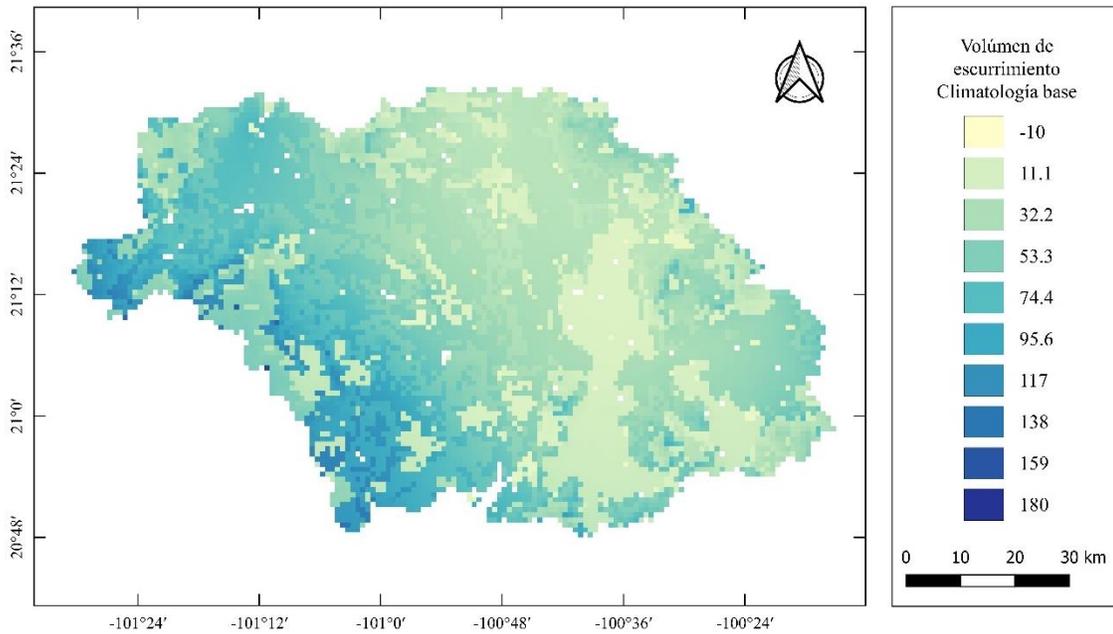


Figura 32. Mapa de los escurrimientos naturales de agua ( $Mm^3$ ) en la cuenca de la Independencia.

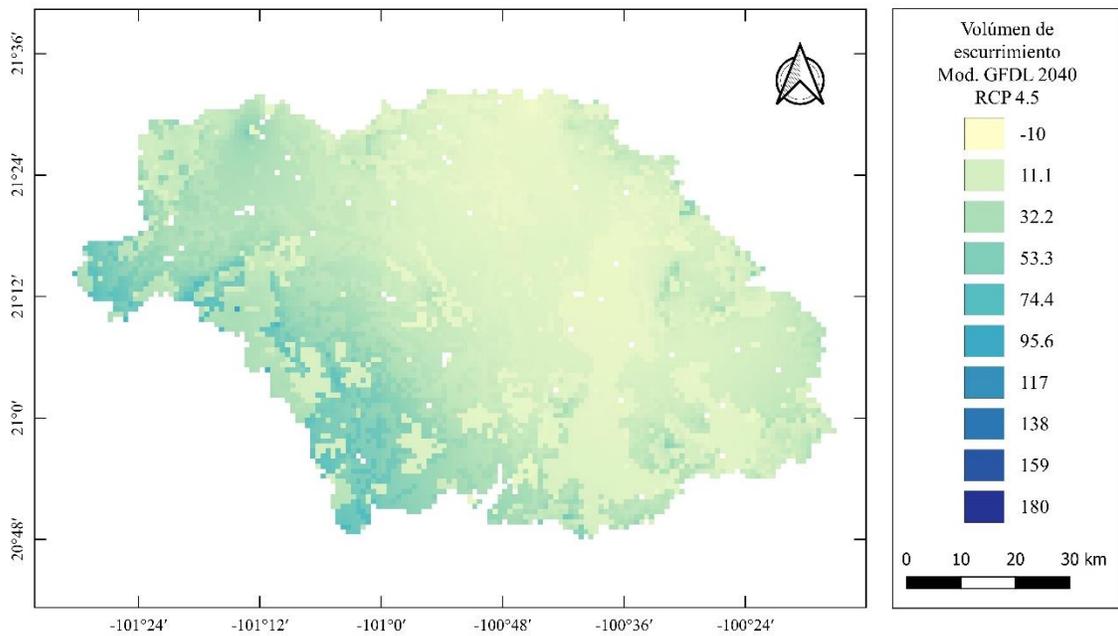
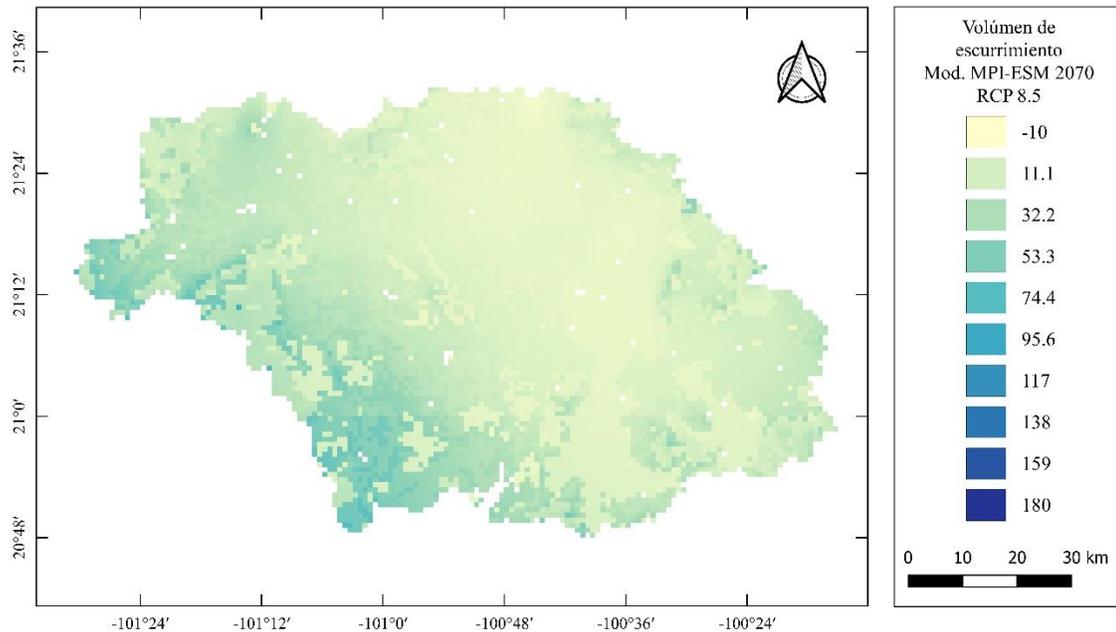


Figura 33. Mapa del volumen de escurrimiento natural ( $Mm^3$ ), modelo GFDL- CM3 RCP 4.5 año 2040.



*Figura 34.* Mapa del volumen de escurrimiento natural ( $\text{Mm}^3$ ), modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

Para el escenario RCP 4.5 del modelo GFDL-CM3 los volúmenes más altos se presentan en la porción suroeste, con un valor máximo de  $101.49 \text{ Mm}^3$ , los valores más bajos se distribuirían en al menos la mitad de la cuenca, principalmente la parte central y norte, el valor más bajo podría presentar un déficit de  $-4.34 \text{ Mm}^3$  (Figura 34), mientras que el escurrimiento total de la cuenca sería de  $18.78 \text{ Mm}^3$ , una reducción de  $25.7 \text{ Mm}^3$  (57.77 %) con respecto de la línea base. De acuerdo al modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 (Figura 35) el volumen de escurrimiento natural se distribuiría de manera similar al modelo GFDL-CM3, diferenciándose con este en una mayor disminución en comparación con la línea base. Se tendrían valores máximos de  $88.01 \text{ Mm}^3$  y en algunas zonas déficits de  $-5.11 \text{ Mm}^3$ , con un valor total de  $16.05 \text{ Mm}^3$ , una disminución de  $28.43 \text{ Mm}^3$  (63.91 %) con relación a la climatología de referencia. En la mayoría de la cuenca se presentarían valores cercanos a 0.

#### 6.2.4 Disponibilidad-déficit de agua superficial actual y bajo escenarios de cambio climático

En la actualidad la cuenca de la Independencia se encuentra en condiciones de déficit hídrico, las áreas con menor déficit se encuentran en la zona suroeste, mientras que dos terceras partes del territorio se encuentran en un rango de -337 y -271 Mm<sup>3</sup> (Figura 36), los valores máximos son -142.91 Mm<sup>3</sup>, los mínimos -313.69 Mm<sup>3</sup> y la media es -269.46 Mm<sup>3</sup>.

A pesar del alto déficit actual, se espera que esta tendencia aumente, de acuerdo al aumento del uso del agua para los cultivos y el descenso de precipitación principalmente. Lo que muy posiblemente se presente en los siguientes años de seguir con las tendencias actuales de uso de agua, las cuales fueron extrapoladas al año 2040 y 2070, teniendo como resultado 442.38 Mm<sup>3</sup> y 585.08 Mm<sup>3</sup> respectivamente datos añadidos a los datos de los modelos climáticos.

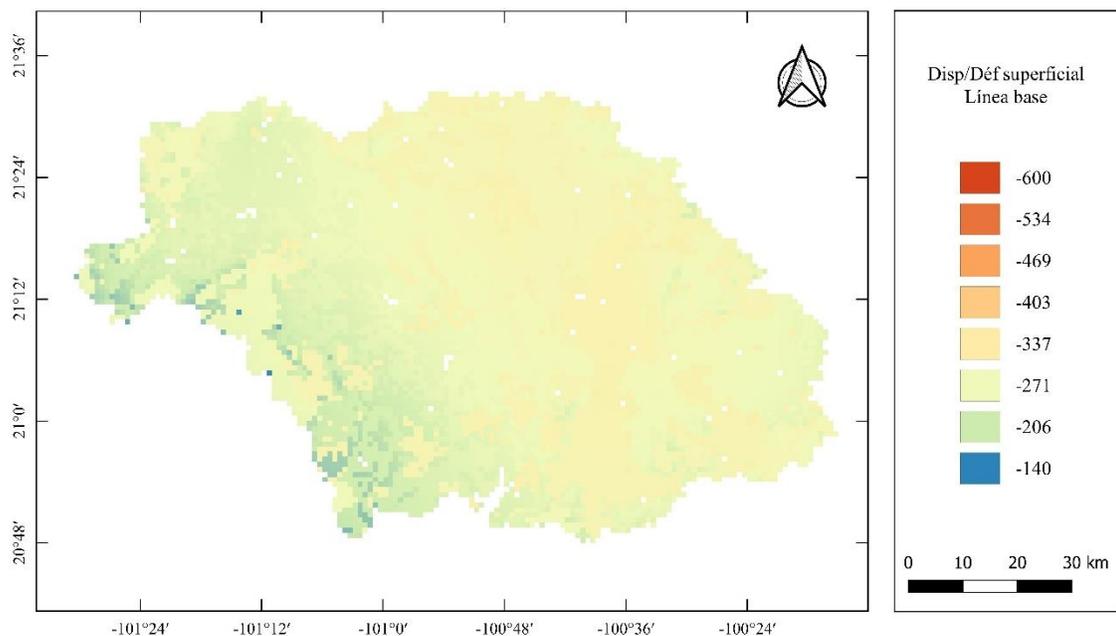


Figura 35. Mapa de disponibilidad hídrica media anual (Mm<sup>3</sup>).

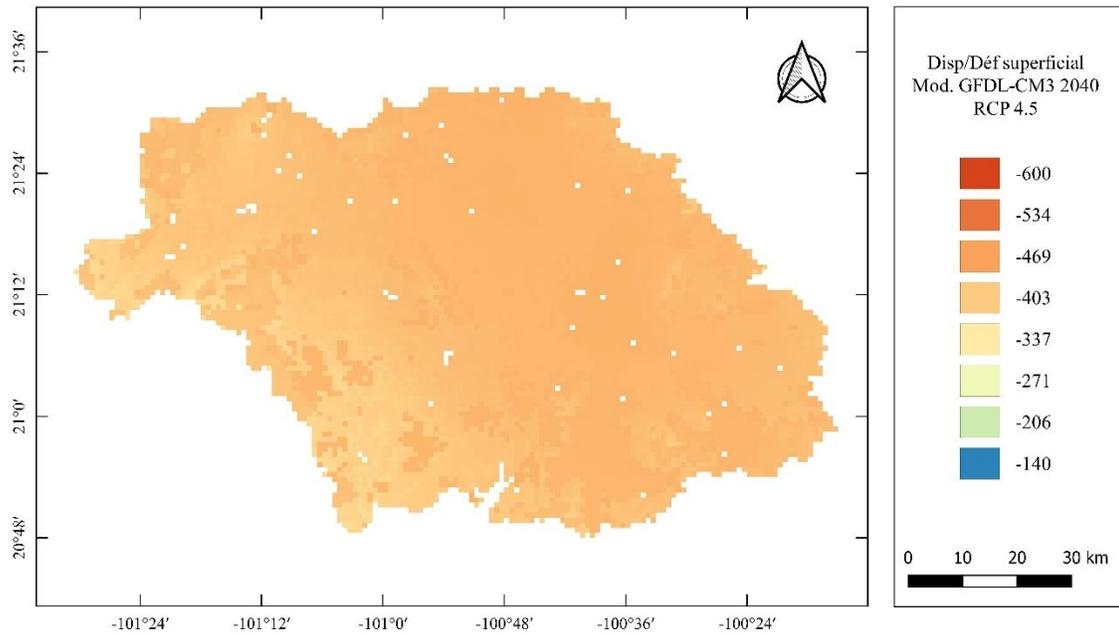


Figura 36. Mapa de disponibilidad-déficit hídrico anual ( $Mm^3$ ) modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040.

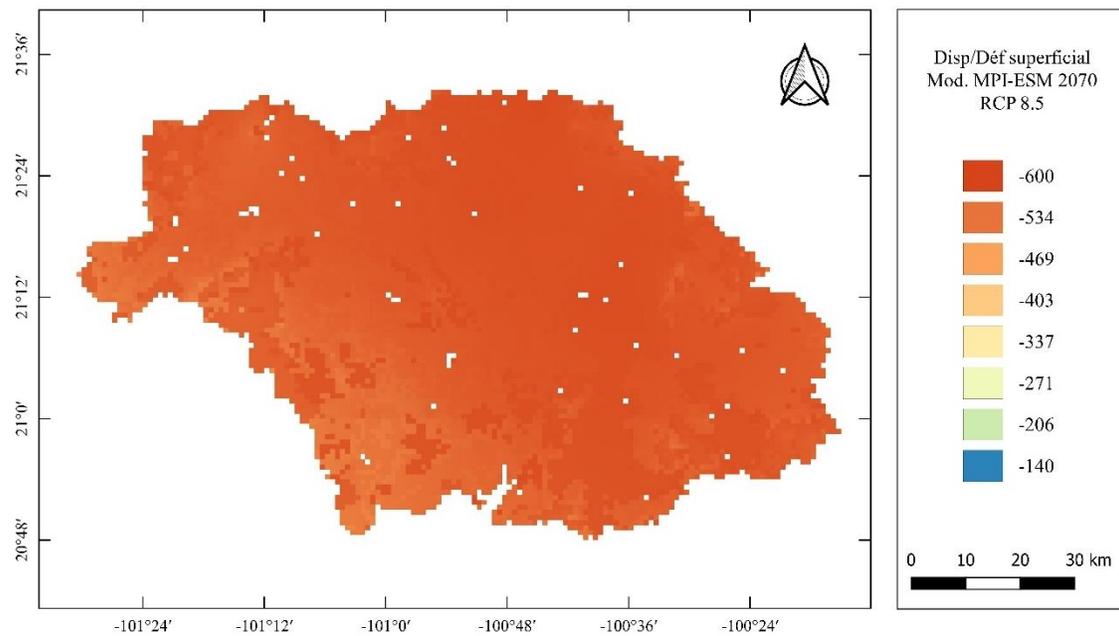


Figura 37. Mapa de disponibilidad-déficit hídrico anual ( $Mm^3$ ) modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

De acuerdo con el escenario RCP 4.5 del modelo GFDL-CM3 el déficit hídrico se acentuaría para toda la cuenca, con un valor máximo de  $-340.88 \text{ Mm}^3$ , el valor más bajo podría presentar un déficit de  $-446.72 \text{ Mm}^3$  (Figura 37), mientras que la media sería de  $-423.59 \text{ Mm}^3$ , un aumento del déficit por  $153 \text{ Mm}^3$  (36.28 %) con respecto de la línea base.

Para los datos del modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 (Figura 38) el déficit de agua presenta valores máximos de  $-497.06 \text{ Mm}^3$ , valores mínimos de  $-590.19 \text{ Mm}^3$ , y una media de  $-569.02 \text{ Mm}^3$ . Un aumento del déficit por  $299.56 \text{ Mm}^3$  (52.64 %) en relación a la climatología de referencia. Para la mayoría de la cuenca se presentarían valores cercanos a la media.

#### 6.2.5 **Vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático**

El índice de vulnerabilidad hídrica en condiciones actuales indica una media de 0.438, en escala de cero a uno. Presenta una sumatoria de 660.87 para las 1506 comunidades evaluadas. El municipio que presentó el índice más alto fue Doctor Mora, con una media de 0.599 para 62 comunidades evaluadas, mínimo de 0.537 y máximo de 0.821. El municipio con los valores más bajos fue San Miguel de Allende, con una media de 0.143, mínimo de cero y máximo de 0.356 para 296 localidades. Los demás municipios se encuentran en un espectro de medias entre 0.448 – 0.568, con un rango mínimo a máximo de 0.353 – 0.798.

Las localidades menos vulnerables se encuentran en la parte central de la cuenca, mientras que los índices más altos se distribuyen al este y al oeste, con rangos similares, en naranja y rojo, mientras que los valores menores en verde al centro-sur y amarillos al centro-norte (Figura 39). Las diferencias tan marcadas entre las localidades de San Miguel de Allende y el resto, se debe a que la mayoría de los programas de ONG's han operado en ahí, lo cual podría indicar que los planes ambientales podrían coadyuvar en la disponibilidad hídrica.

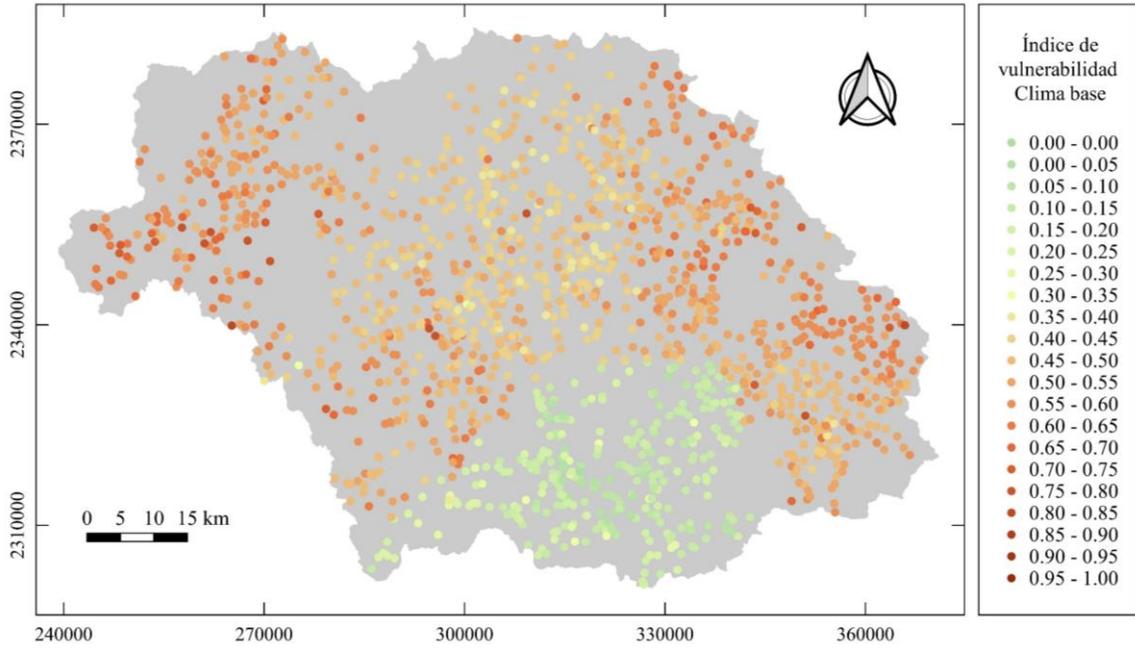


Figura 38. Mapa índice de vulnerabilidad hídrica por localidad.

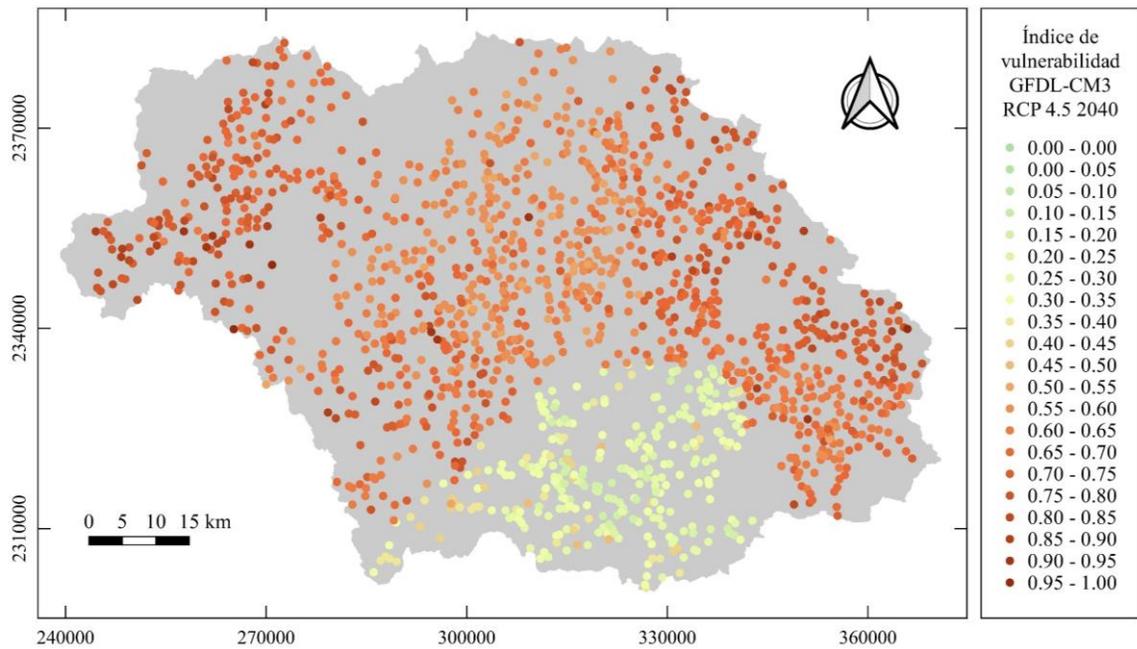


Figura 39. Mapa de vulnerabilidad hídrica modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040.

Para el escenario GFDL-CM3 RCP 4.5 año 2040 el índice de vulnerabilidad se comporta geográficamente de manera similar a la línea base, es decir, los valores más altos a los extremos y los menores al centro de la cuenca (Figura 40). Sin embargo, existe un aumento considerable para cada una de las localidades analizadas. El municipio con valores menores es San Miguel de Allende con una media de 0.298 (incremento de 47.98 %), mínimo de 0.154 y máximo de 0.510. El municipio con valores más altos es Doctor Mora con mínimo de 0.694, máximo de 0.975 y media de 0.75 (incremento de 20.13 %). Mientras que las localidades de los demás municipios se encuentran en intervalos de medias de 0.602 – 0.722, con valor mínimo 0.498 y máximo 0.952 (Figura 40).

Para este escenario los valores, excepto San Miguel de Allende, son más similares entre sí, manteniendo los mismos rangos de medias. El índice de vulnerabilidad hídrica global indica una media de 0.593 y una sumatoria de 893.09 para las 1506 localidades evaluadas.

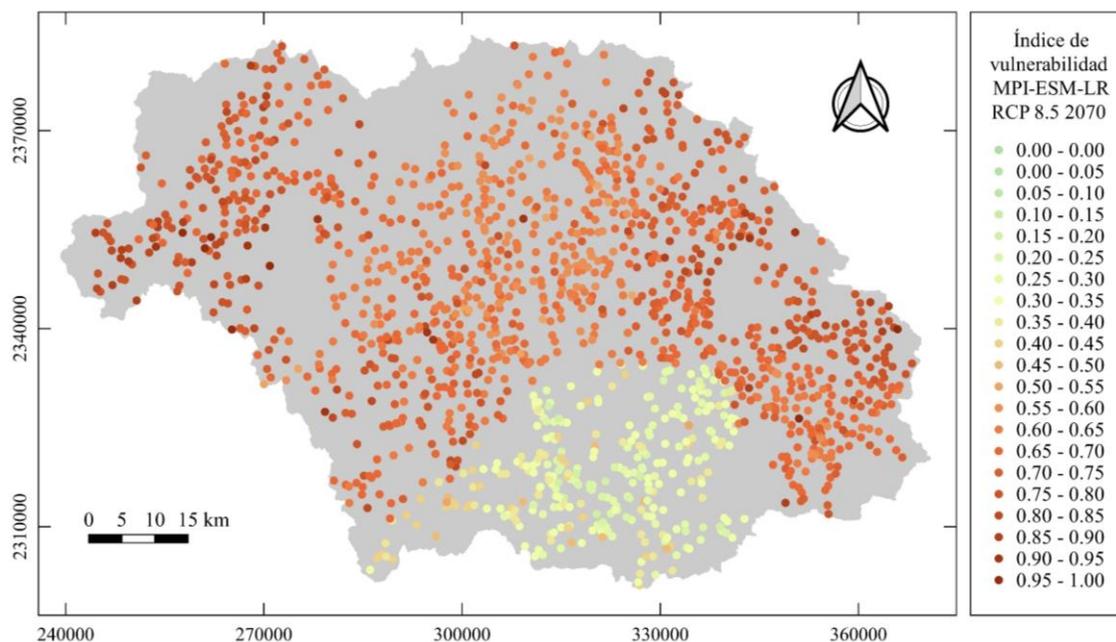


Figura 40. Mapa índice de vulnerabilidad hídrica modelo MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070.

Para el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 año 2070 habría una media de 0.617 (29.01 % de incremento). Presenta una sumatoria de 930.46 (28.97 % más con respecto a la línea base) correspondiente a las 1506 localidades que fueron analizadas.

El municipio con valores menores de nuevo resultaría San Miguel de Allende con una media de 0.323 (incremento de 55.72 %), valor mínimo de 0.179 y máximo de 0.535. El municipio con valores más altos también es Doctor Mora con mínimo de 0.721, máximo de 7 y media de 0.778 (incremento de 23.007 %). Mientras que las localidades de los demás municipios se encuentran en intervalos de medias de 0.627 – 0.747, con dato mínimo 0.532 y máximo 0.977 (Figura 41). En general con ligeros incrementos con respecto a los resultados del índice para el modelo GFDL-CM3.

## 7 Conclusiones

Los efectos de dos exposiciones globales en una escala local, en este caso a nivel de cuenca hidrológica, son dependientes del nivel de intensificación e incidencia de la globalización y de los elementos climáticos en consideración, de los elementos biofísicos y humanos bajo análisis. Para este caso de estudio, los elementos y factores que resienten los efectos de la globalización económica son de diversa índole dependiente del subsistema analizado.

Para el subsistema hidrológico los principales efectos de la globalización económica han sido para las estructuras de captación de agua del río Laja, debido a la construcción de presas y pequeños embalses para el riego de los distintos cultivos que han prevalecido en la cuenca ya por algunas décadas. También ha habido un aumento de las unidades de riego, los que ha llevado al abatimiento de los pozos para riego y la consecuente sobreexplotación del acuífero, que, a su vez, han provocado un aumento en los niveles de arsénico y flúor en el agua. Estos procesos han sido causados por la intensificación en los sistemas de riego de los campos de cultivo ligados de forma directa o indirecta a las compañías nacionales o extranjeras que se encuentran ligadas a las cadenas internacionales de comercio de productos agrícolas.

El modelo agroproductivo ha sido afectado principalmente en cuanto al acceso a la tierra, ya que los distintos niveles de intensificación han provocado un grado de inversión diferenciada en cuanto a la mecanización y/o tecnificación, provocando indirectamente una ventaja competitiva favorable para quienes histórica y actualmente han aprovechado estas divergencias. Una mayor capacidad en intensificación provoca un acceso diferencial a los recursos hídricos, ya que los productores que cuentan con mayor capital pueden acceder de manera prácticamente irrestricta al agua, mientras que los agricultores con menor capacidad

de inversión quedan relegados a la última actualización tecnológica que pudieron implementar o quedan definitivamente fuera del uso del agua.

Los hechos mencionados anteriormente han tenido como causa la modernización e intensificación de los modelos productivos, pasando de sistemas de autoconsumo y venta de excedentes a modelos cada vez más intensivos en el uso de agua y ligados completamente a las cadenas de comercio transnacional, es decir, los efectos más relevantes tienen como raíz la reconversión productiva de la agricultura regional en una versión moderna enfocada sólo en la rentabilidad mediante la transnacionalización de los procesos agrícolas.

Para el subsistema sociopolítico los principales efectos son la diferenciación y exclusión directa e indirecta de grupos sociales específicos. Los principales son los grupos de agricultores de subsistencia y las localidades rurales que no pueden acceder al agua en cantidad y calidad suficientes para poder mantener sus modos de vida, e incluso han sido ya afectados en su salud por el consumo de agua contaminada.

Los medios de subsistencia para los grupos marginados del acceso al agua han sido trastocados, ya no pueden ejercer la agricultura tradicional y han tenido que abandonar sus propiedades y muchas veces se promueve de manera indirecta la migración de estos grupos, mientras que los que se quedan, quedan expuestos a agua de mala calidad.

Los subsidios gubernamentales parten de diseños de otorgamiento que terminan propiciando la discrecionalidad y acaparamiento de los recursos financieros. Lo anterior como consecuencia de un marcado apoyo de las diversas instancias gubernamentales, que mediante planes e incentivos promueven la agricultura de exportación. Otro efecto, como respuesta a la crisis del agua en la cuenca, ha sido la creación de marcos institucionales para

el manejo del bien común agua, mediante los COTAS, con un manejo mixto usuarios-dependencias de gobierno.

Los escenarios de cambio climático indican posibles alteraciones en el balance de agua en la cuenca, principalmente reducciones en los escurrimientos naturales, la precipitación y disponibilidad hídrica; se espera que en los años venideros más efectos adversos en el sistema hidrológico, que ocasionarán distintas reconversiones en los otros subsistemas y en el sistema general. En el subsistema productivo, el creciente déficit hídrico podría generar una nueva reconversión tecnológica, como la intensificación de sistemas de riego supuestamente más eficientes o incluso infraestructura hídrica de mayor calado. Mientras que en términos sociopolíticos podrían existir cada vez más, planes y programas encaminados a la protección del agua, adaptación y restauración ambiental.

En cuanto a los ganadores y perdedores, queda claro que los grupos excluidos, agricultores convencionales y de temporal serán los más afectados, así como las localidades rurales que carecen de acceso a los servicios de agua potable o de los medios para poder obtener agua de calidad. El índice de vulnerabilidad muestra que las localidades con valores más altos también se encuentran en los municipios con pocas intervenciones de iniciativas de ONG's encaminadas a las prácticas de buen manejo de agua, restauración de afluentes o captación de agua de lluvia, en otras palabras, las localidades con menores niveles de intervenciones socioambientales y más marginadas serán las que reciban los mayores efectos adversos del cambio climático y la globalización.

Los ganadores han sido los grupos que han sido beneficiados por las ventajas comparativas del mercado, el gobierno y las distintas políticas nacionales que han propiciado

el acaparamiento de los recursos financieros. Entre estos grupos, los asentamientos ligados a las congeladoras, empacadoras y exportadoras, de capital nacional o internacional, pero que se enmarcan en la lógica de producción y mercado transnacional. Los otros ganadores indirectos, son los funcionarios públicos que se han beneficiado del aparente éxito comercial del modelo agroexportador de Guanajuato y de la creación de programas técnicos que requieren recursos financieros.

Los grupos más efectivos para hacerse de recursos financieros también son los que podrían ser menos vulnerables al déficit hídrico en aumento por cambio climático, en parte porque esos mismos recursos que les permitirían nuevas reconversiones en infraestructura o por la posibilidad de la movilidad del conjunto productivo o simplemente por poder acceder a mayores capacidades de adaptación.

Las sinergias de los efectos de la globalización económica y el cambio climático inciden directamente en la vulnerabilidad hídrica de las localidades analizadas. El aumento del uso del agua por parte de la intensificación agrícola y las disminuciones de precipitación, escurrimiento natural y la disponibilidad del agua, promueven el aumento de la vulnerabilidad. La cual se manifiesta de manera diferencial incluso en unidades territoriales homogéneas (municipios). Las localidades muestran diferentes niveles de vulnerabilidad, incluso en un mismo municipio, aunque siempre muestran un aumento cuando están bajo una doble exposición. Lo anterior da cuenta de la alta dependencia de la vulnerabilidad a la escala de análisis, mientras la escala de estudio es menor, la diferenciación es mayor, ya que los grupos humanos tienen características distintas, que determinan su nivel de sensibilidad, incluso en comunidades cercanas geográficamente y en parte también por la heterogeneidad de la exposición por cambio climático.

Mientras existe un mayor número de iniciativas puntuales, o intervenciones locales, por parte de las ONG's los niveles de vulnerabilidad pueden disminuir, como es el caso de San Miguel de Allende, el cual presentó más intervenciones de este tipo. Si bien, para este caso, el nivel de estrés hídrico presente y futuro irá en aumento, la adecuada planeación de intervenciones específicas puede reducir los niveles de afectación y vulnerabilidad. Sin embargo, en cuanto a los distintos reacomodos de subsistemas, es difícil poder mantener las estructuras actuales, ya que las iniciativas están enfocadas sólo a los recursos hídricos, ambiente y cambio climático. Se vuelve más que urgente una adecuada intervención integral que abarque la mayoría de las dimensiones que están promoviendo la vulnerabilidad hídrica en la región.

La construcción del sistema complejo con respecto a la vulnerabilidad hídrica de la cuenca da cuenta de las interrelaciones entre los elementos más relevantes que influyen en la disponibilidad y acceso al agua. Sistematizar los elementos en subsistemas sirvió para entender el grado de interdefinibilidad de los componentes y cómo los procesos tienen un origen histórico que está concatenado con las repercusiones que han derivado en la actual crisis hídrica en la cuenca de la Independencia. La multiplicidad de factores involucrados y cómo son dependientes el uno del otro, sugiere que las futuras intervenciones tienen que ser integrales, con el objetivo de hacer frente a la problemática asociada a la vulnerabilidad hídrica en la cuenca en sí y en cuanto a la vulnerabilidad hídrica de cada una de las localidades afectadas.

Las nuevas intervenciones tienen que tomar en cuenta no sólo los procesos locales dados en los subsistemas, sino también las condiciones de contorno, estatales y nacionales que, aunque a primera vista no parecieran influir directamente, tienen una influencia difusa en el sistema completo y también diferencial en cada uno de los subsistemas. A pesar de la existencia de intervenciones exitosas a nivel comunitario, si no son transformadas las condiciones de contorno que tienen efectos en el sistema, difícilmente podrán cambiar las características actuales del sistema en general y corren el riesgo de convertirse en meras acciones paliativas que no lograrán revertir las causas de fondo.

A pesar de que en algunos círculos se sigue pensando en el modelo agroexportador como un sistema productivo eficiente en términos económicos, podemos constatar los efectos hidrológicos e hidrosociales negativos y la alta disparidad en cuanto al acaparamiento de recursos, que sumados a los efectos futuros ocasionados por el cambio climático, permiten entender que los escenarios futuros para la cuenca de la Independencia, para el estado de Guanajuato y sitios en condiciones similares (zonas ante una doble exposición global) serán cada vez más agrestes, y es urgente tomar medidas que tiendan a un enfoque de transformación socioambiental, acompañado de medidas de adaptación que abarquen a la mayor cantidad de localidades afectadas. El cálculo del índice de vulnerabilidad hídrica mostró la influencia positiva de las acciones de las ONG's en la reducción de vulnerabilidad, es necesario reescalar las iniciativas, reevaluarlas e intensificarlas en las zonas con los índices actuales más altos. Sin dejar de considerar la imperante necesidad de regular la cantidad de hectáreas cultivadas y el monitoreo efectivo del agua que hace cada usuario agrícola, de lo contrario se seguiría fomentando el actual estado de alta inequidad e injusticia hídrica.

El cálculo del índice de vulnerabilidad hídrica por localidad permitió entender como la vulnerabilidad se distribuye de forma diferencial dependiente de la escala geográfica y que es altamente probable su aumento conforme se avance en el tiempo y los efectos del cambio climático vayan acumulándose. La reducción de precipitación es uno de los elementos más importantes a tener en cuenta, a pesar de esta reducción, seguirá habiendo lluvia y se requiere la implementación urgente de un nuevo modo de provisionamiento de agua, para la mayoría de las comunidades, ya que la contaminación del acuífero no permitirá que se sigan usando sus aguas para consumo humano.

A pesar del gran reto que presupone manejar los recursos hídricos ante una doble exposición, existe la posibilidad de restablecer y restaurar en el algún grado los procesos, las interrelaciones y el manejar el sistema que esté resultando afectado. Sin embargo, los enfoques convencionales son insuficientes si éstos no son implementados a la brevedad, en conjunto con otras iniciativas que aún no se hayan llevado a cabo, reescalar y/o relocalizar las acciones que han tenido algún grado de impacto positivo y contemplar la integralidad, complejidad y funcionalidad.

Si la característica distintiva de los sistemas naturales que se busca manejar es la complejidad, entonces resulta esencial diseñar y proponer mecanismos de regulación y de gobernanza igualmente complejos para esos sistemas (Ostrom, 2000). De acuerdo con la ley de la variedad requerida: cualquier sistema de manejo que se diseñe para regular sistemas complejos debe tener tanta variedad de acciones a realizar como las que existen en los sistemas a regular (Ashby, 1960). El reto es mantener la integralidad, la identidad, función y procesos que permitan cierto nivel de sostenibilidad.

Es importante tomar realmente en serio la ley de la variedad requerida, debido a la cantidad de elementos, actores y las interrelaciones resultantes. De otra manera, si se continúa dándole demasiada importancia a las unidades de manejo simples, de gran escala y centralizadas, que no tienen y no pueden tener la capacidad de respuestas variadas, con las que pueden contar los sistemas de manejo complejos, policéntricos y estratificados, la meta del mantenimiento de los procesos complejos y a varias escalas es inalcanzable (Gadgil y Rao 1994; Ostrom, 2000).

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es la noción de transformación, debido principalmente a que un sistema que se encuentra con cierto nivel de impactos negativos y que se encuentra en una ruta de colapso, en alguno de los subsistemas o en el sistema en general, ya no es posible intervenirlo con la intencionalidad de regenerarlo a un punto anterior, debido a que los estresores actuales no lo permiten y tampoco tomarían en cuenta los efectos futuros, como en el caso de los escenarios climáticos.

Otro punto que destacar es la paradoja de la innovación, debido a que existen algunos signos de alarma que sugieren que las innovaciones tecnológicas lejos de servir a nuestras necesidades pueden en cambio impulsar el desarrollo en una dirección directamente opuesta a la sostenibilidad (Van der Leeuw, 2010). Lo que puede mantener al sistema en una trayectoria que refuerce las rutas actuales de colapso (Westley *et al.*, 2011), como ocurre con los incentivos para la modernización de los sistemas de riego. Esto implica encontrar los marcos institucionales para estimular los tipos de innovación que resuelvan en vez de aumentar nuestros retos ambientales (Steffen *et al.*, 2011).

Las instituciones son las reglas formales y normas sociales informales que la sociedad coloca sobre las organizaciones. Las instituciones culturales, económicas y de gobernanza, juegan un papel importante en la prevención o habilitación de un enfoque de transformación (Westley *et al.*, 2011). Estos involucran los conjuntos de reglas de nivel macro, o las condiciones de contorno, que enmarcan el comportamiento de las diversas organizaciones, desde las autoridades, las empresas privadas, así como las de la sociedad civil (Giddens 1976).

Así, podríamos asumir que las instituciones y su diseño son una parte fundamental para lograr las intervenciones adecuadas para lograr un enfoque de transformación ante el cambio global. Estas instituciones podrían considerarse robustas y sustentables en tanto sus reglas hayan sido diseñadas y modificadas a lo largo del tiempo, de acuerdo con una serie de decisiones colectivas dentro de los lineamientos institucionales elegidos (Shepsle, 1989). Sin reglas bien diferenciadas para las distintas organizaciones y/o actores involucrados, los propietarios no podrán hacer uso de las ventajas que les otorgan los recursos, ni serán capaces de evitar los errores potenciales que podrán ocurrir en el área y su contexto específico (Ostrom, 2000). El primer paso es definir los límites de los recursos y a aquellos autorizados a utilizarlos en aras de lograr una organización colectiva efectiva, además de robustecer los demás principios de diseño institucional. Lo anterior como primer paso para lograr un enfoque integral encaminado a la transformación del sistema, en uno más sostenible.

El enfoque de transformación resalta la no linealidad de los sistemas, contrario a una adaptación incremental, la cual algunas veces mantiene los sistemas existentes tal cual

(IPCC, 2012). Esta aproximación también toma en cuenta los sistemas que están manifiestamente en el punto de colapso, o donde los sistemas en sí mismos, son los principales impulsores de impacto (Revi *et al.*, 2014). Por estos motivos, es que se propone un enfoque transformativo para el presente estudio de caso, debido a la complejidad, a las interacciones entre subsistemas y porque se encuentra en un punto de posible en el aspecto hídrico. Las opciones de adaptación habitual podrían limitarse a proteger las propiedades de los sistemas existentes, incluso cuando estos están asociados con las causas estructurales de daño o que están generando presiones para un eventual colapso o cambios que generen más efectos adversos (Handmer y Dovers 1996). Si se desea lograr un sistema sostenible, el enfoque de transformación ofrecería una herramienta para abordar las causas raíz de las fallas estructurales actuales (Pelling, O'Brien y Matyas, 2015), con la intención de generar nuevas interacciones y procesos que promuevan el bienestar y tiendan a subsanar los efectos adversos ya observados y proyectados.

A pesar de que se le ha prestado menos atención que a otras medidas (mitigación y adaptación) la transformación encierra un alto potencial de respuesta al cambio ambiental global (O'Brien, 2012). En este sentido, no es de sorprender, ya que la transformación a menudo puede llegar a desafiar el *status quo* y puede parecer una amenaza a quienes se benefician del estado y estructuras prevalecientes (Pelling, 2011), sin embargo, es urgente afrontar las adversidades ambientales de forma realista y directa. La transformación puede ser definida como los cambios físicos o cualitativos en la forma, estructura, función o incluso identidad (Folke *et al.*, 2010; Nelson, Adger y Brown, 2007) de los sistemas socioambientales que se pretendan intervenir. Estos cambios son direccionales e intencionales (Chapin, Kofinas y Folke, 2009; Berkhout, 2002), pero no tratan de "diseñar" el futuro, sino más bien

de reconocer que algunos cambios fundamentales son necesarios para permitir futuros sostenibles (Miller, 2007). Para este caso, reducir al máximo el aumento de la vulnerabilidad hídrica, el aumento de la intensificación agrícola y la amplitud de los cambios técnicos hídricos.

Los cambios requeridos incluyen una combinación de innovaciones ecotecnológicas, reformas institucionales, cambios culturales y de comportamiento; estos cambios a menudo implican el cuestionamiento de valores, el desafío de supuestos, y la capacidad de examinar de cerca creencias fijas, identidades y estereotipos (O'Brien, 2012). En el estado actual de degeneración de los socioecosistemas, los cambios profundos resultan imprescindibles para hacer frente a la complejidad de los efectos adversos del cambio ambiental global. Una transformación requiere de gestión de transiciones, la cual presta especial atención a la reflexión, aprendizaje, interacción, integración y experimentación a nivel social (McAlpine, 2015), pero no se deben olvidar las posibles intervenciones ambientales, ecológicas o de innovación provenientes de otras aproximaciones para enfrentar el cambio global. Sus fundamentos conceptuales han sido observados en un nivel de escala regional y han sido empíricamente probados en la gestión de recursos hídricos en Países Bajos y Bélgica (Loorbach, 2010). Sin embargo, una de sus limitaciones es no tomar tanto en cuenta las interacciones con el nivel macro en el cual está embebido el sistema (condiciones de contorno), como las estructuras políticas generales o las relaciones internacionales, lo que puede reducir la viabilidad de gobernanza derivada de los procesos de gestión de transición (Voß y Bornemann, 2011). Es decir, una respuesta integral para construir vías de resolución de una problemática particular, que también tome en cuenta las posibles propiedades emergentes resultantes, incluso de las mismas intervenciones.

Para subsanar las relaciones macro-micro, desde las investigaciones sobre los recursos de uso común, se han atribuido una serie de ventajas a los sistemas de gobierno policéntricos, que van desde la promoción del aprendizaje, la confianza y la gestión del riesgo de colapso de los recursos (Marshall, 2009); debido a que la mayoría de las interacciones entre el ser humano y los recursos naturales tienen lugar en múltiples escalas (Blomquist, 2009) anidadas e interdefinidas. Un sistema de gobierno policéntrico funcional para los bienes comunes cumple con tres presupuestos básicos: 1) los sistemas de gobernanza policéntricos pueden adecuarse mejor cuando se enfrentan a cambios sociales y ambientales; 2) proporcionan un buen ajuste institucional para sistemas complejos de recursos naturales; y 3) mitigan el riesgo de fracaso institucional y pérdida de recursos debido a equipos redundantes de tomadores de decisiones que emplean instituciones diversas y a menudo incompatibles entre sí (Carlisle *et al.*, 2017).

Entenderemos las instituciones como el conjunto de reglas, normas y estrategias formales e informales que estructuran las interacciones humanas y los recursos (Ostrom, 2005). De acuerdo con Ostrom (1991), un sistema institucional policéntrico está compuesto por muchas unidades autónomas formalmente independientes entre sí y puede tener dos atributos: 1) centros de toma de decisiones múltiples y superpuestos con cierto grado de autonomía; 2) capacidad de acción que tenga en cuenta a los demás a través de procesos de cooperación, competencia, conflicto y resolución de conflictos (Carlisle *et al.*, 2017).

La gobernanza policéntrica requiere una combinación compleja de múltiples niveles y diversos tipos de organizaciones provenientes de los sectores público, privado y voluntario que tienen ámbitos de responsabilidad y capacidades funcionales superpuestos; donde las asociaciones voluntarias y las organizaciones comunitarias desempeñan funciones de apoyo

críticas en un sistema policéntrico de gobierno, incluso si no se les han asignado funciones públicas de manera oficial (McGinnis y Ostrom, 2011). Sin embargo, no todas las organizaciones o personas interesadas en un dominio de gobernanza constituyen un centro de toma de decisiones. Sólo los que ejercen una considerable independencia para proponer normas y reglas dentro de un dominio específico son centros de toma de decisiones (Ostrom, 1999). Las legislaturas, agencias administrativas y otros organismos públicos son claramente candidatos para ser centros de toma de decisiones, al igual que las comunidades de usuarios de recursos, que elaboran y hacen cumplir el marco institucional (Low, Ostrom, Simon y Wilson, 2003).

Las organizaciones o individuos, estatales o no estatales, que carecen de autoridad para establecer reglas en un dominio de gobernanza particular, pero que influyen fuertemente en las políticas o brindan apoyo técnico o financiero crítico, caen en la categoría de: rol de apoyo crítico (McGinnis y Ostrom, 2011). Es decir, el funcionamiento efectivo de un sistema de gobernanza policéntrica a menudo depende de actores que puedan prestar experiencia técnica o producir un bien o servicio de manera más eficiente y efectiva (Ostrom, Tiebout y Warren, 1961). Esto es particularmente importante en la obtención de información e innovaciones adecuadas para la toma de decisiones, intervenciones en campo y la resolución de conflictos en una escala específica, sin necesidad de recurrir a un estrato normativo superior.

La relevancia de contar con un sistema de gobernanza policéntrico incidiría positivamente en la asignación y monitoreo del agua (Garduño *et. al.*, 2003). Es necesario reconducir a los COTAS a un marco institucional que promueva la descentralización, para que adquieran un adecuado nivel de independencia financiera y administrativa, ya que son las principales unidades de gestión hídrica y tienen que estar anidadas en las unidades superiores, pero sin

que se trastoque su nivel de autonomía. En un primer punto, se podría plantear la asignación de recursos mediante partidas presupuestarias mixtas por parte de las distintas organizaciones gubernamentales superiores, estatales y federales. De esta manera, las atribuciones de comando y control no recaerían sólo en las comisiones del agua, estatal o federal. Esto es importante debido a que los resultados de las acciones de los COTAS dejen de responder a posibles directrices de las élites, que hayan permeado a través de las organizaciones gubernamentales.

Otro tópico para promover la descentralización sería el compromiso efectivo de las organizaciones ambientales estatales y municipales, como el Instituto de Ecología de Guanajuato, la Procuraduría Estatal del Medio Ambiente y los departamentos municipales de agua y ambiente. Parte de ese involucramiento iniciaría con las asignaciones de recursos financieros a los concejos, pero también sería necesario que los resultados técnicos de los COTAS se transmitieran transversalmente y pudieran iniciar un proceso de capacitación a los funcionarios entrantes que no tienen puesto base. La junta general de los COTAS tendría que estar monitoreada por los distintos órganos financiadores, pero sin tener voto.

La baja representatividad de los COTAS puede atenderse mediante una nueva convocatoria ciudadana, para lograr que los sectores no agrícolas se encuentren adecuadamente representados; ya que los mayores usuarios son los agricultores y estos se ven más como productores que como gestores del agua. Se requieren de representantes de los usuarios domiciliarios municipales, que puedan tener también derecho a la asignación de recursos y puedan participar en la estructura de gobernanza institucional, ya que actualmente la representatividad es sólo por parte de funcionarios públicos que cambian de acuerdo a la administración política en curso. Es decir, dar cabida a la integración de agrupaciones de la

sociedad civil constituidas formal o informalmente con el mismo voto que el sector agrícola, ya que el número de beneficiarios municipales supera con mucho a los usuarios agrícolas, aunque su volumen de uso de agua sea menor. Lo anterior igual aplicaría para los otros sectores que han sido subestimados en la gestión del agua, como el sector comercial, industrial o de nuevas viviendas.

Los COTAS han derivado en asociaciones para dar apoyo técnico y asesorías hídricas; valdría aclarar actualmente su papel como conector de la red de usuarios o como agrupación dedicada sólo a cuestiones técnicas; ya que podría ser que se haya orientado más a una organización de rol de apoyo crítico y, por tanto, no podría fungir adecuadamente en la formulación de instituciones. Sin embargo, el rol de apoyo técnico, si existe una adecuada capacidad de socialización de resultados, puede ser crucial en la implementación de reglas, generando información valiosa que coadyuve a la resolución de conflictos. Las otras organizaciones de rol de apoyo crítico son las organizaciones ambientales o ecologistas formalmente constituidas que han generado datos técnicos o iniciativas hídricas en la región. De igual forma, incluir las redes de educación, universidades u otras que hayan aportado datos, informes u otros conocimientos técnicos valiosos, que puedan ser contrastantes con los datos oficiales.

Las otras organizaciones que tendrían que formar parte formal de este sistema policéntrico, serían las asociaciones civiles constituidas legalmente. Ya sea que formen parte de la red de usuarios o no. Sus aportes han sido valiosos y podrían ser más, sin embargo, al no ser parte de la institucionalidad ni de los recursos, sus aportaciones han sido marginalizadas. El otro grupo importante que integrar, serían los afectados ambientales directos e indirectos, es decir, los grupos de personas que ya padecen algún grado de

vulnerabilidad hídrica o ya sufren de enfermedades derivadas de tomar agua contaminada. Su inclusión favorecería el monitoreo efectivo del uso del agua, ya que no son usuarios mayoritarios, no pertenecen a las estructuras gubernamentales y no pertenecen a las élites productivas.

Los organismos federales podrían participar en este nuevo marco institucional, pero como un nivel de participación más limitado. Debido a la escasa capacidad de movilidad logística, pero su alto nivel agencia legal, son los candidatos idóneos para desempeñarse como medios de resolución de conflictos e impartición de sanciones a quienes violen la normatividad. Las instituciones participantes deberían ser principalmente la SEMARNAT, CONAGUA y PROFEPA. Así se seguiría manteniendo la autonomía de la red de usuarios, sin el efecto contraproducente de facilitar que los grupos locales, que se benefician de las condiciones actuales, puedan desequilibrar los niveles bajos o intermedios de este sistema policéntrico. Es decir, se requiere que las dependencias públicas vuelvan a tener su rol de garantes de legalidad. Promover la descentralización del sistema, también consideraría disminuir atribuciones e injerencias de dependencias gubernamentales, que no estén involucradas directamente en el cuidado del ambiente, por dos motivos: 1) simplificar las relaciones, normas y reglas, y 2) evitar iniciativas que promueven directa o indirectamente el deterioro de los recursos. Y, por otra parte, involucrar como organizaciones de rol crítico a las dependencias que normalmente no participan en la gestión de recursos, como las dependencias de salud y protección civil. Para que puedan salvaguardar la seguridad de la población en condiciones de vulnerabilidad, riesgo o que ya padezcan los efectos negativos de esta doble exposición.

La siguiente serie de cambios sistémicos se llevaría a cabo en el sistema agroproductivo, el cual ha resultado ser el que más cambios a sufrido y más interrelaciones con efectos negativos ha tenido. La transformación de este subsistema es la que requiere una mayor dosis de innovación y ajustes estructurales. Uno de los cambios sería la reasignación de subsidios, dirigiéndolos a los grupos de usuarios que históricamente han sido marginados, suprimiendo gradualmente la promoción de la modernización de los sistemas de riego y optar por mecanismos de asignación de recursos a la capacitación ecotecnológica. Suprimir los subsidios a la energía eléctrica, con la finalidad de desincentivar el uso intensivo de los sistemas de bombeo; acompañando a los productores en la mejora de la aplicación del riego, mediante capacitación técnica.

Una vez reevaluado la posible descentralización, se requiere ajustar los principios de diseño de diseño institucional. A continuación, una formulación general de las medidas potenciales:

1) Límites claramente definidos: debido a que la cuenca se encuentra en estado de veda, es necesario tener en claro que no puede haber más aprovechamientos. Así, como determinar progresivamente las concesiones que tendrían que disminuir su capacidad de extracción, para alcanzar paulatinamente un nivel de recarga-aprovechamiento por encima del déficit.

2) Coherencia entre las reglas de apropiación y provisión con las condiciones locales: es deseable que las concesiones sean claras en cuanto a los metros cúbicos utilizados, así como la correspondencia del usuario con el número de hectáreas, para evitar el mercado informal del agua. Que se correspondan las aguas concesionadas de acuerdo a la normatividad vigente de la CONAGUA.

3) Arreglos de elección colectiva: verificar los estatutos comunales de los sistemas y unidades de riego para la incorporación de nuevas organizaciones que puedan participar de la creación y modificación de las reglas operativas, en este caso, los consejos consultivos ciudadanos formales o informales deberían tener voz y voto.

4) Monitoreo: Implementación de medidores para las tomas legalmente concesionadas. Crear una red mixta de vigilancia, para la identificación de aprovechamientos ilícitos. Grupos de guarda hídrica que colaboren en relación directa con la procuraduría ambiental estatal y federal, con fondos financieros adjudicados.

5) Sanciones graduadas: Revocación de las concesiones a los usuarios que extraigan más agua de la estipulada, después de las advertencias previas consensuadas. Multas para quienes operen pozos que carezcan de concesión formal, de acuerdo a lo estipulado por los consejos de vigilancia, que pueden ser del orden económico, supresión de servicios o exclusión de las redes de comercio de la producción.

6) Mecanismos para la resolución de conflictos: orden jerárquico de las organizaciones, de acuerdo a la escala: local, municipal, regional o estatal y federal. Cada uno de los desacuerdos sería resuelto en el área de competencia específica y según el nivel de las reglas. Incorporación efectiva de una red de observadores ciudadanos y de organizaciones legalmente constituidas, que acrediten su pertenencia.

7) Reconocimientos mínimos de derechos de organización: la mayoría de las organizaciones pertenecientes a la gestión del agua gozan de reconocimiento legal, sin embargo, las organizaciones alternas, como las asociaciones ciudadanas, colectivos, redes de afectados, son agrupaciones informales, que carecen de estatutos legales. Es necesario

incorporar a estos grupos dentro de los estatutos de otras organizaciones formales y crear las figuras legales que les permita formar parte efectiva de la red de usuarios y sus estructuras.

8) Entidades anidadas: Los concejos, asambleas, redes de usuarios y otras organizaciones de manejo de los bienes naturales, deben estar en concordancia con la legislación vigente, además de cumplir con las relaciones establecidas y estipuladas previamente dentro de los alcances de su propia reglamentación. Las dependencias federales no tendrían que contravenir a las normas pactadas dentro de las asociaciones locales, pero sí participar activamente en la impartición de justicia, en caso de irregularidades. Los demás organismos informales también tienen que incluirse a la red de relaciones formales, como las ONG's, asociaciones civiles, colectivos, etc., pero siempre salvaguardando su integridad y autonomía, y la dotación de recursos financieros que permitan su participación activa.

Las transformaciones tentativas para el subsistema agroproductivo, son las más relevantes, debido a que los cambios históricos han determinado el nivel de degradación en la cuenca. Es necesario un cambio de paradigma en cuanto a la productividad agrícola, las técnicas, uso del agua, comercialización, etc.; para lograr ser un factor clave en la resolución de la crisis, en lugar de ser el mayor estresor. Existe un fomento económico a la inversión agroindustrial, pero se ha olvidado la inversión en las escalas locales campesinas, es necesario relocalizar los subsidios y diversificarlos, anulando progresivamente los subsidios a la modernización del riego. También es urgente una reforma a las políticas de asignación de recursos, para evitar la asignación discrecional.

Comparando rendimientos de orgánicos/agroecológicos y de agricultura convencional en todo el mundo, se encontró que, en promedio, los sistemas orgánicos y agroecológicos

producen tanto, o más que los sistemas convencionales; contrario a la creencia convencional de que la agricultura industrial es necesaria para producir alimentos suficientes (Perfecto y Vandermeer, 2010). Existe evidencia que indica que la producción campesina familiar o de pequeña escala que adoptan métodos agroecológicos pueden ser como tanto o más productiva que la agricultura industrial (Badgley, 2007). La restricción de una adecuada implementación reside en la multiplicidad de enfoques y conceptos, no estaríamos hablando de pequeñas granjas ecológicas expandiéndose para convertirse en latifundios; más bien, adoptar una visión de escala que promueva la heterogeneidad, relocalización de prácticas y técnicas, recuperación de un sentido de solidaridad, reciprocidad y proporción saludable del sistema alimentario (Ferguson *et al.*, 2019). Esta visión de reescalamiento agroecológico reforzaría la autonomía y la diversidad socioecológica, situando al sistema agroproductivo como un elemento clave de transformaciones sociales más amplias (Ferguson *et al.*, 2019), como la adecuada gestión del territorio y la planeación y manejo del uso del suelo.

El enfoque sería el de intensificación sostenible, la cual puede conceptualizarse como sigue: es la adopción de prácticas a lo largo toda la cadena de valor del sistema alimentario que cumpla las necesidades crecientes de alimentos nutritivos y saludables a través de prácticas que construyan resiliencia socioecológica y mejoren el capital natural dentro de un espacio operativo seguro del sistema ambiental (Rockström *et al.*, 2017), en este sentido, los autores también proponen una serie de principios, algunos proclives a implementarse en la cuenca de la Independencia son los siguientes:

Planificar las prácticas a nivel de localidad en el contexto de interacciones a escala cruzada con la cuenca, los biomas y el paisaje en su conjunto.

Maximizar el nivel de productividad de los ranchos y granjas mediante la funcionalidad ecológica; priorizando las prácticas agrícolas, donde los bienes naturales (suelo, biodiversidad, nutrientes, agua) sean utilizados como herramientas para el desarrollo, productividad y resistencia de los cultivos.

Desarrollar prácticas agrícolas basadas en el manejo integral de tierra, agua, nutrientes, ganado y policultivos.

Utilizar variedades de cultivos y razas de ganado con una alta relación de productividad de uso externo e interno.

Adoptar enfoques circulares para el manejo natural de recursos, por ejemplo, reciclaje de nutrientes, mezclas orgánicas, respeto por los ciclos naturales, fijación biológica de nitrógeno y alelopatía.

Ayudar a los agricultores a superar la adopción inmediata de este nuevo paradigma construyendo incentivos para su adopción sostenida y haciendo rentable el enfoque agroecológico a largo plazo.

Construir instituciones sólidas de pequeños y medianos agricultores, dirigidas especialmente por mujeres, que permitan una interfaz equitativa, tanto con los mercados, como con los distintos sistemas de gobernanza.

Las anteriores prácticas requieren de actores con algún grado de agencia en la cuenca. El grado de implementación requiere de toma de acuerdos y creación de un marco institucional policéntrico, similar al de los usuarios de agua. Las organizaciones más idóneas serían las asociaciones civiles que ya han trabajado en este sentido, sin embargo, la limitante principal

son los recursos financieros. Es necesario involucrar a estas agrupaciones dotándolas de un financiamiento inicial, con el objetivo de promover e implementar las iniciativas resultantes de un proceso horizontal. Para encaminarse en este enfoque, sería idóneo la implementación del modelo de matriz agroecológica, el cual inicia en un mosaico heterogéneo que de entrada promueve la policentralidad, la inclusión y la planeación del territorio, lo cual es importante debido a que la actual expansión del modelo agroexportador ha degradado áreas de los ecosistemas locales.

Una posibilidad es iniciar con escuelas campesinas, que se basen en la enseñanza campesino a campesino. Podrían ser el detonante de transferencia de ecotecnologías y promover los procesos de creación de institucionalidad. Estas escuelas serían transdisciplinarias, ya que requerirían de la participación de académicos, representantes de la sociedad civil, universidades, organizaciones gubernamentales, ONG's y los propios productores. La principal función inicial sería la construcción de capacidades y el acceso equitativo al conocimiento. Para que, en una segunda etapa, los productos del co-diseño se puedan reescalar en las áreas pertinentes.

En una tercera etapa, la introducción de sistemas agropastoriles en las zonas degradadas serviría para implementar ciclos cerrados de producción, promoviendo la restauración y mantenimiento de la funcionalidad ecosistémica. Para una adecuada implementación se necesita de un marco legal estatal que promueva esta transformación, sin embargo, ni la SAGARPA federal, ni las dependencias agrícolas estatales, tienen esto contemplado. Faltaría la incorporación de este esquema en las reglas operativas de las instancias oficiales, para que la obtención de recursos fuera accesible. Debido a que esto es un proceso tardado, la opción sería la concurrencia de recursos municipales, donaciones y los mismos rendimientos

económicos producto de las iniciativas previas, es decir la autogestión de recursos financieros.

El subsistema hídrico tiene varias aristas que igual deben atenderse de manera integral, propiciando la innovación. La consecuencia principal es las enfermedades provocadas por agua contaminada. Estos casos se presentan con mayor frecuencia en las localidades rurales marginadas. Al respecto, las ONG's han participado activamente en aliviar este problema. Las principales acciones han sido la cosecha de agua de lluvia a nivel domiciliario, instalación de filtros de carbón activado para eliminar el exceso de flúor y arsénico, campañas de comunicación y sensibilización de la problemática hídrica en la cuenca, conformación de redes interinstitucionales, mecanismos de financiamiento, manejo integral de la cuenca, capacitación e intercambio de experiencias técnicas, y acciones de restauración. Es decir, existe trabajo previo consolidado, que ha beneficiado a la población más vulnerable. Lo que se requiere es un seguimiento de estas acciones, con la debida atención y asignación de recursos, debido a que los trabajos están supeditados a los tiempos de las convocatorias, confluencia de recursos nacionales o internacionales y las limitantes o topes de financiamiento de las agencias de ayuda humanitaria o ambiental.

El trabajo previo de las ONG's y voluntarios queda reflejado en el índice global de vulnerabilidad, ya que sus acciones han promovido un descenso de vulnerabilidad hídrica en las localidades y municipios donde ha habido este tipo de intervenciones. Sin embargo, es necesario mayor apoyo, reescalar las iniciativas e incorporar otras que pudieran seguir promoviendo este tipo de avances en la resolución de la problemática hídrica en las localidades más vulnerables. Debido a que se han enfrentado a las condiciones actuales, pero no están preparadas para los posibles escenarios futuros de disminución de precipitación y

aumento de temperatura. Una de las posibilidades es la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza (SBN), las cuales se ajustan al entramado institucional que ya se ha implementado en distintas acciones.

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN por sus siglas en inglés) define las soluciones basadas en la naturaleza como: las acciones para proteger de manera sostenible, gestionar y restaurar ecosistemas naturales o modificados que aborden los desafíos de la sociedad de manera efectiva y adaptativa, al mismo tiempo que proporciona beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad (Cohen-Shacham, Walters, Janzen y Maginnis, 2016; Seddon, Turner, Berr, Chausson y Girardin, 2019). Un denominador común a la diversidad de conceptos, es el reconocimiento del rol que la naturaleza puede desempeñar en abordar desafíos sociales, incluida la respuesta al cambio climático y la gestión del riesgo de desastres; el término soluciones implica un enfoque centrado en el problema y se basa en una visión sobre las SBN para entregar simultáneamente beneficios para la sociedad y el medio ambiente, una característica que a menudo se denomina multifuncionalidad (Calliari, Staccione y Mysiak, 2019). Las SBN involucran la aplicación de procesos participativos para el codiseño, co-creación y cogestión y dependencia de estrategias multidisciplinarias basadas en evidencia; en una escala de intervención urbana y/o de paisaje ecológico; e involucra ingeniería ecológica, infraestructura verde y azul, y un enfoque ecosistémico (Calliari, Staccione y Mysiak, 2019; Nesshöver *et al.*, 2017).

Los principios para el diseño de este tipo de iniciativas involucran distintos aspectos interrelacionados (Nesshöver *et al.*, 2017):

- 1) Asegurar el uso de conceptos y métodos transdisciplinarios mediante el uso de:

Las ciencias naturales para la innovación y evaluación.

La ingeniería ecológica en el diseño y pruebas.

Las ciencias sociales y económicas para la inclusión de los distintos puntos de vista involucrados.

- 2) Enfrentar la incertidumbre, complejidad y conflictos, para lograr compensaciones justas y equitativas, considerando:

La multifuncionalidad natural y sus retos asociados.

Las implicaciones del contexto específico.

El manejo adaptativo en circunstancias de alta incertidumbre.

- 3) Asegurar la inclusión de los involucrados directos y la sociedad civil en general, considerando:

Las compensaciones y los múltiples beneficios de las SBN.

La sostenibilidad y la calidad conjunta de las SBN.

- 4) Desarrollar soluciones multifuncionales de entendimiento común, desarrollando:

Procesos de decisión que muestren las diferentes rutas de solución.

Principios comunes de identidad.

- 5) Evaluación y monitoreo para el mutuo aprendizaje entre escalas.

- 6) Para finalmente establecer las SBN sostenibles, las cuales tendrán como meta:

Establecer inversiones y financiamiento para aprovechar los beneficios de las SBN.

Desarrollar e implementar apropiadamente los diseños institucionales.

Asegurar la distribución equitativa de los beneficios y riesgos.

Asegurar los objetivos ambientales proclives de inclusión y monitoreo.

Basándose en los principios anteriores y el trabajo comunitario previo de las ONG's, puede llegar a ser factible reescalar algunas de sus iniciativas. La primera sería la cosecha de agua de lluvia domiciliaria. Ya que la mayoría de los grupos vulnerables son pequeñas comunidades rurales, suena plausible transformar el sistema de abastecimiento público de agua potable. Cambiar el esquema de llevar el agua de los pozos mediante sistemas de alimentación, a una aproximación de cosecha de agua de lluvia comunitaria. Para que esto fuera posible, se requiere de co-diseño entre infraestructura azul e ingeniería ecológica, para poder llegar a la construcción de centros comunitarios para la cosecha de agua y restauración ecológica, que sirvan de aprovisionamiento comunitario de agua no contaminada y a la vez puedan servir de reservorios para las posibles iniciativas de regeneración ecológica.

Un proyecto de esta naturaleza sería una plataforma para las prácticas apropiadas a una región caracterizada por la escasez de agua y serviría de motor de bienestar para los asentamientos humanos. Se emplearían materiales y tecnologías apropiadas, adaptadas a las necesidades de un programa orientado a la autosuficiencia hídrica y de restauración (Fernández y Trillo, 2014). Los sistemas de captación de agua y la construcción del centro serían respetando la diversidad ecológica, contando con áreas de capacitación y transferencias ecotecnológicas para forestación, cultivos acuáticos, superficies de captación de lluvia, zonas de pastoreo, ecosistemas nativos y restauración ecológica. Sería una iniciativa multifuncional, donde la captación de agua de lluvia no fuera el último fin; además serviría para iniciar procesos comunitarios de restauración de ecosistemas y paisajes. Dentro de estos, las riberas de los arroyos y el río Laja, serían zonas prioritarias.

Otra innovación posible por incorporar, podría ser el diseño hidrológico del terreno para precipitaciones limitadas, el cual puede integrarse a los centros de cosecha de agua, para

capacitación e implementación. Consiste en diseñar y manejar el patrón de laboreo del suelo de manera tal que, permite captar y almacenar el agua de lluvia en él, lo que hace posible maximizar el agua y restituir al suelo su profundidad y fertilidad; proviene de un sistema de manejo del suelo con enfoque integral, desarrollado por P. A. Yeomans, en Australia, con el propósito de construir suelo fértil y de alta productividad (Cortés y Ramírez, 2013).

Sirve para manejar el agua de lluvia en una finca con base en la topografía del terreno, a través de zanjas, canales, reservorios, arados y caminos. Incorpora el diseño del patrón de cultivos, el cual nunca favorece los monocultivos. Se basa en un punto-clave esta normalmente en la parte inferior de los valles, donde el terreno pierde abruptamente la pendiente fuerte y toma una pendiente más suave; la línea-clave parte a ambos lados del punto-clave y recorre el terreno a la misma altura. Esta línea permite que toda el agua que llega a el punto-clave se distribuya por toda la línea-clave, así aún el terreno situado en la cresta del terreno tendría el mismo nivel de agua, logrando irrigar las crestas, que en el método normal tienden a enviar el agua hacia los valles, así se distribuye el agua hacia todo el terreno (Yeomans, 1973). Este tipo de diseños han sido implementados en Colombia, Australia, España, Portugal, y en algunas zonas de México. Estas innovaciones requerirían estar interconectadas para poder aprovecharlas mejor, produciendo beneficios comunitarios a corto y mediano plazo. Sin embargo, también requieren de manejo adaptativo posterior, debido a la novedad de éstas, en esta zona. Así se asegura la evaluación técnica, y la resolución de posibles desajustes.

A pesar del alto número de intervenciones y cambios requeridos, es preciso hacer mención sobre las ventajas a mediano y largo plazo que pudieran tener en la transformación del sistema en general. El subsistema hidrológico podría regenerarse disminuyendo la

vulnerabilidad hídrica. El subsistema agroproductivo si llegara a cambiar a un esquema agroecológico, sería un factor decisivo para lograr aminorar el alto consumo de agua en la cuenca, también reduciendo la vulnerabilidad y promoviendo el bienestar del ecosistema. Para finalmente robustecer el subsistema sociopolítico y la red de arreglos institucionales resultantes. La inacción sería mucho más costosa en todos los ámbitos: financiero, de bienestar humano, ecológico, hídrico, urbano y rural. Establecer nuevos marcos de acción y diseño, que contemplen la complejidad y la transformación, pueden tener efectos positivos en la resolución de los efectos adversos del cambio ambiental global.

## 8 Bibliografía

- Aceves, E. (1979). *El ensalitramiento de los suelos bajo riego; identificación, control, combate y adaptación* (No. 04; CP, S595 A2.).
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability [Vulnerabilidad]. *Global environmental change*, 16(3), 268-281.
- Anderson, K. (2010). Globalization's effects on world agricultural trade, 1960–2050 [Efectos de la globalización en el comercio agrícola mundial, 1960-2050]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1554), 3007-3021.
- Ashby, R. (1960). *Design for a brain: the origin of adaptative behavior [Diseñar para el cerebro: el origen del comportamiento adaptativo]*. New York: Wiley.
- Ávila, P. (2007). Las cuencas hidrográficas de México y su vulnerabilidad socioambiental por el agua. En: *Sustentabilidad y desarrollo ambiental. Agenda para el desarrollo, vol. 14*. Calva, J. (Ed.). Miguel Ángel Porrúa. México, DF.
- Ávila, P. (2012). Cambio global y seguridad hídrica en México. En: *Cambio climático y políticas de desarrollo sustentable*. Calva, J. L. (Coord.). Consejo nacional de universitarios. Juan Pablos Editores. México.
- Ávila, P. (2014). Agua y cambio global en México. En: problemas ambientales asociados al desarrollo. Macip-Ríos, R. y Espinosa, O. (Ed.). Instituto de ciencias de gobierno y desarrollo estratégico. CEDE. BUAP.
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M. J., Aviles-Vazquez, K., ... y Perfecto, I. (2007). Organic agriculture and the global food supply [Agricultura orgánica y el suministro global de alimentos]. *Renewable agriculture and food systems*, 22(2), 86-108.
- Beck, U. (1998). *La sociedad del riesgo: hacia una nueva modernidad*. Paidós ibérica.
- Berkhout, F. (2002). Technological regimes, path dependency and the environment [Regímenes tecnológicos, rutas de dependencia y ambiente]. *Global environmental change*, 12(1), 1-4.

- Blomquist, W. (2009). Multi-level governance and natural resource management: the challenges of complexity, diversity, and uncertainty [Gobernanza multinivel y manejo de recursos naturales: los retos de la complejidad, diversidad e incertidumbre]. In *Institutions and sustainability* (pp. 109-126). Springer, Dordrecht.
- Board, O. S. y National Research Council. (2000). *Clean coastal waters: understanding and reducing the effects of nutrient pollution* [Limpiar las aguas costeras: comprender y reducir los efectos de la contaminación por nutrientes]. National Academies Press.
- Boas, T. C. y Gans-Morse, J. (2009). Neoliberalism: from new liberal philosophy to anti-liberal slogan [Neoliberalismo: de la nueva filosofía liberal al eslogan anti-liberal]. *Studies in comparative international development*, 44(2), 137-161.
- Bromley, D. (2006). Toward understanding global tension: natural resources and competing economic histories [Hacia la comprensión de la tensión global: recursos naturales e historias económicas en competencia]. *Global Environmental Change*, 17, 18.
- Bruijnzeel, L. A. (2001). Forest hydrology [Hidrología forestal]. *The Forests Handbook: An Overview of Forest Science*, 1, 301-343.
- Calliari, E., Staccione, A. y Mysiak, J. (2019). An assessment framework for climate-proof nature-based solutions [Marco de evaluación para soluciones basadas en la naturaleza ante el cambio climático]. *Science of The Total Environment*, 656, 691-700.
- Carlisle, K. y Gruby, L. (2017). Polycentric systems of governance: a theoretical model for the commons [Sistemas de gobernanza policéntrica: modelo teórico para los comunes]. *Policy Studies Journal*.
- Casas, A., Torres, I., Delgado-Lemus, A., Rangel-Landa, S., Ilesley, C., Torres-Guevara, J., Cruz A., Parra F., Moreno-Calles A., Ortiz T. y Farfán, B. (2017). Ciencia para la sustentabilidad: investigación, educación y procesos participativos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 113-128.
- Cassman, K. G., Wood, S., Choo, P. S., Cooper, H. D., Devendra, C., Dixon, J. A. y Pretty, J. (2005). Cultivated systems [Sistemas cultivados]. 745-794 p. En Hassan, R. (Ed). *Ecosystems and human well-being: current state and trends* [Ecosistemas y bienestar humano: estado actual y tendencias]. Findings of the condition and trends working group. The Millenium Ecosystem Assesement. Volúmen 1. Island Press. N.Y.

- Castells, M. (1998). The information age: economy, society, and culture [La era de la información: economía, sociedad y cultura]. End of millennium, Vol. 3. Malden, MA and Oxford: Blackwells.
- CEAG (2006). Memoria Institucional 2000–2006 de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). Guanajuato, México.
- Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste [CCGSS]. (2017). *¿Qué es el cambio global?* México. *ccgss.org*. Recuperado de: <http://ccgss.org/que-es-cambio-global/>
- Chapin III, F., Kofinas, G. y Folke, C. (Eds.). (2009). *Principles of ecosystem stewardship: resilience-based natural resource management in a changing world* [Principios de gobierno ecosistémico: manejo de recursos naturales basados en la resiliencia en un mundo cambiante]. Springer Science & Business Media.
- Clark, W. C. y Dickson, N. M. (2003). Sustainability science: the emerging research program [Ciencia de la sostenibilidad: el programa de investigación emergente]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8059-8061.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. y Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges [Soluciones basadas en la naturaleza para enfrentar los retos sociales globales] . *IUCN, Gland, Switzerland*, 97.
- Comisión Nacional del Agua. Estado de Guanajuato: Títulos y Volúmenes de Aguas Nacionales y Bienes Inherentes por Uso de Agua, 31 de julio, 2013. : <http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=5&n2=37&n3=35&n4=19&n5=19>
- CONAGUA (2000). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Laguna Seca, estado de Guanajuato. Comisión Nacional del Agua. Subdirección general técnica. Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México, D.F.
- CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México. Edición 2008. Comisión Nacional del Agua. Mexico.
- CONAGUA (2011). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA (2014). Atlas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. México.

- CONAGUA (2014). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA (2015a). Subdirección general técnica. Gerencia de aguas subterráneas. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), Estado de Guanajuato. Diario Oficial de la Federación. México.
- CONAGUA (2015b). Subdirección general técnica. Gerencia de aguas subterráneas. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna Seca (1104), Estado de Guanajuato. Diario Oficial de la Federación. México. CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México.
- CONAGUA (2017). Subdirección general de administración del agua. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA (2017b). Subdirección general de administración del agua. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA (2018a). Estadísticas del agua. Sistema nacional de información del agua. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONAGUA (2018b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), estado de Guanajuato. Comisión Nacional del Agua. Subdirección general técnica. Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos. Diario Oficial de la Federación (D. O. F.). México.
- CONAGUA (2018c). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna Seca (1104), estado de Guanajuato. Comisión Nacional del Agua. Subdirección general técnica. Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos. Diario Oficial de la Federación (D. O. F.). México.
- CONAPO (2010). Comisión Nacional de Población. Intensidad migratoria a nivel estatal y municipal. México.
- Conde, C. (2010). El cambio climático. De lo inequívoco a lo incierto. *México frente al cambio climático. Retos y oportunidades*.
- Conde, C. (2012). Impactos, vulnerabilidad y adaptación de la agricultura en México al cambio climático. En: *Análisis estratégico para el desarrollo, vol. 14. Cambio climático y políticas de desarrollo sustentable*. Cord. Calva J. L. Juan Pablos Editor S.A. 1ª edición

(2012). Consejo Nacional de Universitarios para una Nueva Estrategia de Desarrollo. México.

- Conde-Álvarez, C. y Saldaña-Zorrilla, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30.
- Cortés, T. H. y Ramírez, L. J. (2013). Diseño hidrológico del terreno (sistema Keyline), en parcelas agrícolas con precipitación limitada: manual técnico. Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. México
- Dabat, A. (2002). Globalización, capitalismo actual y nueva configuración espacial del mundo. En: *Basave, J. Globalización y alternativas incluyentes para el siglo XXI*, Porrúa, México.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., y Puma, M. J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade [Agotamiento de aguas subterráneas embebido en el comercio internacional de alimentos]. *Nature*, 543(7647), 700.
- De León, I. N., Gárfias-Soliz, J. y Mahlkecht, J. (2005). Groundwater flow regime under natural conditions as inferred from past evidence and contemporary field observations in a semi-arid basin: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México. [Régimen de flujo de agua subterránea en condiciones naturales como se infiere de la evidencia pasada y observaciones de campo contemporáneas en una cuenca semiárida: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México]. *Journal of arid environments*, 63(4), 756-771.
- Diario Oficial de la Federación, D. O. F. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. *Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Distrito Federal, México: Secretaría de Gobernación. Recuperado de: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015)
- ENA (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Ericksen, P. J. (2008). What is the vulnerability of a food system to global environmental change [¿Qué es la vulnerabilidad de un sistema alimentario al cambio ambiental global?]. *Ecology and Society*, 13(2), 14.

- FAO (2016 a). Riego, cultivos regados y medio ambiente. AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
  - FAO (2016 b). Extracción de agua y presión sobre los recursos hídricos renovables. AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
  - Ferguson, B. G., Maya, M. A., Giraldo, O., Terán Giménez Cacho, M. M. Y., Morales, H., y Rosset, P. (2019). Special issue editorial: What do we mean by agroecological scaling? [Editorial especial: ¿Qué queremos decir con reescalamiento agroecológico?]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43:7-8, 722-723
  - Fernández, E. A., Zavala, H. J., Romero, C. R., Conde, A. C. y Trejo, V.I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INDAUTOR 04-2011-120915512800-203. Recuperado de: [http://atlasclimatico.unam.mx/AECC\\_descargas/](http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/)
  - Fernández, D y Trillo, J. (2014). Centro comunitario para la cosecha de agua y la agroforestería. Argentina. Arqa internacional. Recuperado de: <https://arqa.com/arquitectura/centro-comunitario-para-la-cosecha-de-agua-y-la-agroforesteria.html#>
- Flores-López, H. E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K. F., Ruiz-Corral, J. A., Martínez-Sifuentes, J. A., Díaz-Mederos, P., y Alemán-Martínez, V. (2003). Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *Terra Latinoamericana*, 21(3), 389-400.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. y Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability [Pensamiento en resiliencia: integrando resiliencia, adaptabilidad y transformabilidad]. *Ecology and society*, 15(4).
  - Foster, S. y Shah, T. (2013). Aguas subterráneas y agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible. *Documentos de perspectiva*. Global Water Partnership.
  - Gadgil, M., y Rao, S. (1994). On designing a system of positive incentives to conserve biodiversity for the ecosystem people of India [Diseño de un sistema de incentivos

positivos para conservar diversidad para el ecosistema de personas en India]. En: *Workshop on Design Principles. Beijer Institute, Stockholm, Suecia.* (pp. 27-28).

- García, R. (1986). Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos. En: García, B., Montes, J. M. y Garcia, B. *Problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo.* Ed. Siglo XXI.
- García, R. (1988). *Deterioro ambiental y pobreza en la abundancia productiva: el caso de la Comarca Lagunera* (No. INVES-ET P01 G216).
- García, R. (1988 b). *Modernización en el agro: ¿ventajas comparativas, para quién? El caso de los cultivos comerciales en el Bajío.* UNRISD/IFIAS/CINVESTAV. (No. 338.109723 G3) Programa análisis de los cambios en la Biosfera. UAM-Xochimilco, México.
- García, R. (2006). Dinámica de los sistemas complejos. *Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria.* Barcelona, España: Ed. Gedisa.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Revista latinoamericana de metodología de las ciencias sociales, vol. 1, no. 1.* Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- García, R. (2013). Investigación interdisciplinaria de sistemas complejos: lecciones del cambio climático. *Interdisciplina, 1(1).*
- Garduño, H., Nanni, M., Foster, S. S., Tuinhof, A., Dumars, C. y Kemper, K. (2003). Stakeholder participation in groundwater management: mobilizing and sustaining aquifer management organizations [Participación de los interesados en la gestión de aguas subterráneas: movilización y mantenimiento de organizaciones de gestión de acuíferos]. En *GW-MATE Briefing Note Series* (Vol. 6). Banco Mundial.
- Gay, C. y Rueda, C. (2012). Vulnerabilidad social y cambio climático. En: Perevochtchikova, M. (Coord.). *Cultura del agua en México: conceptualización y vulnerabilidad social* (No. 333.91 333.9100972 C8 CUL).
- Gereffi, G. (1995). Global production systems and third world development [Sistemas de producción global y desarrollo del tercer mundo]. *Global change, regional response: The new international context of development.*

- Giddens, A. (1976). *New rules of sociological method: a positive critique of interpretative sociologies [Nuevas reglas del método sociológico: una crítica positiva a las sociologías interpretativas]*. John Wiley & Sons.
- González, M. E, Haces M. A. y Rangel L. (2011). Metodología para valorar índices de vulnerabilidad ante el cambio climático y acciones de compensación en las costas de Tamaulipas. 1er congreso nacional de investigación en cambio climático. Ciudad de México, del 17 al 21 de octubre del 2011.
- González, H. (2014). Specialization on a global scale and agrifood vulnerability: 30 years of export agriculture in Mexico [Especialización a escala global y vulnerabilidad agroalimentaria: 30 años de agricultura de exportación en México]. *Development Studies Research. An open access journal*, 1(1), 295-310.
- Graciano, J. C. (2013). Uso del agua y agricultura de exportación en Baja California Sur. Perspectivas desde el agro para el desarrollo regional. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Tesis Maestría en Ciencias Sociales. La Paz, Baja California Sur.
- GWP [Global Water Partnership] (2000). *Towards water security: A framework for action [Hacia la seguridad del agua: un marco para la acción]*. GWP Secretariat.
- Handmer, J. W. y Dovers, S. R. (1996). A typology of resilience: rethinking institutions for sustainable development [Una tipología de resiliencia: repensando las instituciones para el desarrollo sostenible]. *Industrial & Environmental Crisis Quarterly*, 9(4), 482-511.
- Harvey, D. (1995). Globalization in question [Globalización en cuestión]. *Rethinking marxism*, 8(4), 1-17.
- Hebben, T. (2009). Analysis of water quality conditions and trends for the long-term river network: Athabasca river, 1960-2007 [Análisis de las condiciones y tendencias de la calidad del agua para la red fluvial a largo plazo: el río Athabasca, 1960-2007]. *Water Policy Branch*, Alberta Environment, Edmonton, AB, Canada, 341 pp.
- Holling, C. S. y Gunderson, L. H. (2002). Resilience and adaptive cycles [Resiliencia y ciclos adaptativos]. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*, 25-62.
- Hoogesteger, J. y Wester, P. (2017). Regulating groundwater use: The challenges of policy implementation in Guanajuato, Central México [Regulación del uso de aguas

subterráneas: los desafíos de la implementación de políticas en Guanajuato, México Central]. *Environmental Science & Policy*, 77, 107-113.

- INEGI (2010). Actividades Económicas. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de:  
<http://cuentame.inegi.org.mx/economia/primarias/agri/default.aspx?tema=E#sp>
- INEGI (1994). Estadísticas del Medio Ambiente de México. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Aguascalientes: Gobierno de México.
- INEGI (2012). Banco de Información Económica. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Aguascalientes: Gobierno de México.
- INEGI (2015). Encuesta intercensal 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Instituto de ecología de Guanajuato. (2011). Diagnóstico Climatológico y prospectiva sobre vulnerabilidad al cambio climático en el estado de Guanajuato.
- Instituto Internacional del Manejo del Agua. (2007). Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida. Londres: Earthscan y Colombo.
- IPCC (2007). Pachauri, R. K., y Reisinger, A. Informe de síntesis. *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*.
- IPCC (2012), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [Manejo de riesgos a eventos extremos y desastres, para promover la adaptación al cambio climático]. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field, C B, V Barros, T F Stocker, D Qin, D J Dokken, K L Ebi, M D Mastrandrea, K J Mach, G-K Plattner, S K Allen, M Tignor and P M Midgley (editors), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 582 pages.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. The physical science basis [Resumen para responsables de políticas. La base de la ciencia física]. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V.

Bex and P.M. Midgley (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA

- IPCC (2014). *Climate change 2014. Impacts, adaptation and vulnerability: regional aspects [Impactos, adaptación y vulnerabilidad: aspectos regionales]*. Cambridge University Press.
- Jiménez-Cisneros, B., Oki, T., Arnell, N. Benito, G., Cogley, J., Döll, P. Jiang, T. y Mwakalila, S.. (2014): Freshwater resources [Recursos de agua dulce]. En: *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EUA, pp. 229-269.
- Karl, T. R., Melillo, J. M., Peterson, T. C. y Hassol, S. J. (Eds.). (2009). *Global climate change impacts in the United State [Impactos del cambio climático global en los Estados Unidos]*. Cambridge University Press.
- Kates, R. W. (2011). What kind of a science is sustainability science? [¿Qué tipo de ciencia es la ciencia de la sostenibilidad?]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19449-19450.
- Kates, R. W. (2012). *From the unity of nature to sustainability science: ideas and practice [De la unidad de la naturaleza a la ciencia de la sostenibilidad: ideas y práctica]*. En: Weinstein, M. P., & Turner, R. E. (Eds.). *Sustainability science: The emerging paradigm and the urban environment*. Springer Science & Business Media.
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., McCarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C., Grubler, A., Huntley, B., Jager, J., Jodha, S. N., Kasperson, R. E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore, B., O'Riordan, T., Svedin, U. y Faucheux, S. (2001). Sustainability science [Ciencia de la sostenibilidad]. *Science*, 292(5517), 641-642.
- Keys, E. y McConnell, W. J. (2005). Global change and the intensification of agriculture in the tropics [Cambio global y la intensificación de la agricultura en los trópicos]. *Global Environmental Change*, 15(4), 320-337).
- Landa, O. R., Ávila, F. B. y Hernández, M. (2010). Cambio climático y desarrollo sustentable para América Latina y el Caribe: conocer para comunicar. México.

- Leichenko, R. M. y O'Brien, K. L. (2002). The dynamics of rural vulnerability to global change: the case of southern Africa [Dinámicas de la vulnerabilidad rural ante el cambio climático: el caso del sur de África]. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 1-18.
- Leichenko, R. y Silva, J. A. (2014). Climate change and poverty: vulnerability, impacts, and alleviation strategies [Cambio climático y pobreza: vulnerabilidad, impactos y estrategias de alivio]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(4), 539-556.
- Lin, B. B., Perfecto, I. y Vandermeer, J. (2008). Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops [Las sinergias entre la intensificación agrícola y el cambio climático podrían crear vulnerabilidades sorprendentes para los cultivos]. *AIBS Bulletin*, 58(9), 847-854.
- Loorbach, D. (2010). Transition management for sustainable development: a prescriptive, complexity-based governance framework [Manejo de transición para el desarrollo sostenible: un marco prescriptivo para la gobernanza basada en la complejidad]. *Governance*, 23(1), 161-183.
- Low, B., Ostrom, E., Simon, C. y Wilson, J. (2003). Redundancy and diversity: do they influence optimal management [Redundancia y diversidad: la influencia del manejo óptimo]. *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*, 83-114.
- Magrin, G., Gay, C., Cruz, D., Giménez, C., Moreno A., Nagy, C. Nobre y Villamizar, A. (2007). Impacts, adaptation and vulnerability [Impactos, adaptación y vulnerabilidad]. *Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Marañón, B. (1999). La gestión del agua subterránea en Guanajuato. La experiencia de los COTAS. *Estudios Agrarios*, 12, 1-21.
- Margat, J. y Van der Gun, J. (2013). *Groundwater around the world: a geographic synopsis [Agua subterránea alrededor del mundo: una sinopsis geográfica]*. Crc Press.
- Marshall, G. R. (2009). Polycentricity, reciprocity, and farmer adoption of conservation practices under community-based governance [Policentralidad, reciprocidad y adopción de prácticas de conservación bajo gobernanza basada en la comunidad]. *Ecological economics*, 68(5), 1507-1520.

- McAlpine, C., Seabrook, L., Ryan, J., Feeney, B., Ripple, W., Ehrlich, A., y Ehrlich, P. (2015). Transformational change: creating a safe operating space for humanity [Cambio transformacional: creando un espacio de seguridad para la humanidad]. *Ecology and Society*, 20(1).
- McGinnis, M. y Ostrom, E. (2011). Reflections on Vincent Ostrom, public administration, and polycentricity [Reflexiones sobre Vincent Ostrom, administración pública y policentralidad]. *Public Administration Review*, 72(1), 15-25.
- Miller, R. (2007). Futures literacy: a hybrid strategic scenario method [Conocimientos futuros: método de escenario estratégico híbrido]. *Futures*, 39(4), 341-362.
- Molden, D. (2007). *Water for food, water for life. A comprehensive assessment of water management in agriculture: summary [Agua para la comida, agua para la vida. Una evaluación integral de la gestión del agua en la agricultura: resumen]*. International Water Management Institute.
- Monterroso, A. I., Conde, A. C., Gay, C., Gómez Díaz, J. D. y López García, J. (2012). Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- Monterroso, A., Conde, C., Gay, C., Gómez, D. y López, J. (2014). Two methods to assess vulnerability to climate change in the Mexican agricultural sector [Dos métodos para evaluar la vulnerabilidad ante el cambio climático en el sector agrícola mexicano]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(4), 445-461.
- Montes-Rojas, R. T., Ospina-Noreña, J. E., Gay-García, C., Rueda-Abad, C. y Navarro-González, I. (2015). Water-Resource Management in Mexico Under Climate Change [La gestión de los recursos hídricos en México ante el cambio climático]. En *Sustainability of Integrated Water Resources Management* (pp. 215-243). Springer International Publishing.
- Mora, D., Carmona, J. y Cantoral-Uriza, E. A. (2015). Diatomeas elípticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(4), 1024-1040.
- Morera Camacho, C. (2010). La gran empresa mexicana en la globalización. *Revista Herramienta*.

- Najam, A., Runnalls, D. y Halle, M. (2016). Environment and globalization: five propositions [Ambiente y globalización: cinco proposiciones]. *The Globalization and environment reader*, 94.
- Navarro de León, I. (2006). Explotación y renovabilidad del agua subterránea en una cuenca semiárida del Altiplano Mexicano. *Ciencia UANL*, 9(4).
- Nelson, D., Adger, N. y Brown, K. (2007). Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework [Adaptación al cambio ambiental: contribuciones a un marco de resiliencia]. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 32, 395-419.
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., ... y Krauze, K. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective [La ciencia, política y práctica de las soluciones basadas en naturaleza: una perspectiva interdisciplinaria]. *Science of the Total Environment*, 579, 1215-1227.
- Newell, P. (1999). Globalisation and the environment: exploring the connections [Globalización y el ambiente: explorando las conexiones]. *IDS Bulletin*, 30(3), 1-7.
- O'Brien, K. (2012). Global environmental change II: from adaptation to deliberate transformation [Cambio ambiental global II: de la adaptación a la transformación deliberada]. *Progress in Human Geography*, 36(5), 667-676.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed A., Bhadwal S., Barg, S., Nygaard, L. y West, J. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India [Mapeo de la vulnerabilidad a múltiples factores de estrés: el cambio climático y la globalización en la India]. *Global environmental change*, 14(4), 303-313.
- O'Brien, K. L. y Leichenko R. M. (2008): Climate change, globalization and water scarcity [Cambio climático, globalización y escasez de agua]. Expo Zaragoza. España.
- O'Brien, K. L. y Leichenko, R. M. (2000). Double exposure: assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization [Doble exposición: evaluación de los impactos del cambio climático en el contexto de la globalización económica]. *Global environmental change*, 10(3), 221-232.
- Ortega-Guerrero, A., (2009) Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca

hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México, 26 Núm. 1 *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 143-61.

- Ortega-Guerrero, G. M. A., Castellanos, J. Z., Aguilar, R., Vázquez-Alarcón, A., Alanis, E. y Urrutia, F. (2002). A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity and pH at the Independence aquifer in Guanajuato [Un modelo conceptual para aumentos de sodio, SAR, alcalinidad y pH en el acuífero Independence en Guanajuato]. *Terra*, 20(2), 199-207.
- Ospina-Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., y Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia [Análisis del balance hídrico bajo escenarios regionales de cambio climático para zonas áridas de Colombia]. *Atmósfera*, 30(1), 63-76.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action* [El gobierno de los comunes: la evolución de instituciones para la acción colectiva]. Cambridge University press.
- Ostrom, E. (1999). Coping with tragedies of the commons [Lidiando con la tragedia de los comunes]. *Annual review of political science*, 2(1), 493-535.
- Ostrom, E. (2000). Diseños complejos para manejos complejos. *Gaceta ecológica*, (54), 43-58.
- Ostrom, E. (2005). Understanding institutional diversity [Entendiendo la diversidad institucional]. Princeton University press. *New Jersey*, 393-432.
- Ostrom, V. (1991). *The meaning of american federalism* [El significado del federalismo americano]. San Francisco: Institute for Contemporary Studies Press.
- Ostrom, V., Tiebout, C. M., & Warren, R. (1961). The organization of government in metropolitan areas: a theoretical inquiry [La organización del gobierno en áreas metropolitanas: una investigación teórica]. *American political science review*, 55(4), 831-842.
- Oswald, Ú. (2012a). Seguridad del agua en México, analizado con el modelo PEISOR. En: *Cultura del agua en México: conceptualización y vulnerabilidad social*. Perevochtchikova, M. (Coord.<sup>a</sup>). México.

- Oswald, Ú. (2012b). Cambio ambiental global, desastres y vulnerabilidad social. En: *Análisis estratégico para el desarrollo, vol. 14. Cambio climático y políticas de desarrollo sustentable. Calva J. L. (Cord.)*. Juan Pablos Editor S.A. 1ª edición (2012). Consejo Nacional de Universitarios para una Nueva Estrategia de Desarrollo. México.
- Palacios Vélez, E. y López López, C. (2004). Sobreexplotación de las cuencas hidrológicas: el caso de la cuenca del río de La Laja, Guanajuato. En *Manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (pp. 117-131). INE/SEMARNAT.
- Paz, J. I. (2005). La globalización: Más que una amenaza es una oportunidad. *Revista EIA*, (3), 21-34.
- Pelling, M. (2011). *Adaptation to climate change: from resilience to transformation* [Adaptación al cambio climático: de la resiliencia a la transformación]. Routledge. Oxon, UK.
- Pelling, M., O'Brien, K., & Matyas, D. (2015). Adaptation and transformation [Adaptación y transformación]. *Climatic Change*, 133(1), 113-127.
- Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato 2006- 2030, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), 2006, México.
- Ramankutty, N., Foley, J. A., Norman, J. y McSweeney, K. (2002). The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change [La distribución global de las tierras cultivables: patrones actuales y sensibilidad al posible cambio climático]. *Global Ecology and biogeography*, 11(5), 377-392.
- Reis, N. (2014). Coyotes, concessions and construction companies: illegal water markets and legally constructed water scarcity in central Mexico [Coyotes, concesiones y empresas de construcción: mercados ilegales de agua y escasez de agua legalmente construida en el centro de México]. *Water Alternatives*, 7(3).
- Renault, D. y Montginoul, M. (2003). Positive externalities and water service management in rice-based irrigation systems of the humid tropics [Externalidades positivas y gestión del servicio de agua en sistemas de riego basados en arroz de los trópicos húmedos]. *Agricultural water management*, 59(3), 171-189.
- Revi, A., Satterthwaite, D., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R., Pelling, M., y Sverdlík, A. (2014). Towards transformative adaptation in cities: the IPCC's Fifth

Assessment [Hacia la adaptación transformativa en ciudades: el quinto reporte del IPCC]. *Environment and Urbanization*, 26(1), 11-28.

- IMTA (2010): Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales. En: efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Volumen III. Secretaria de Medio Ambiente y Recurso Naturales- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., y Nykvist, B. (2009). A safe operating space for humanity [Un espacio operativo seguro para la humanidad]. *Nature*, 461(7263), 472.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., ... y de Fraiture, C. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability [Intensificación sostenible de la agricultura para la prosperidad humana y la sostenibilidad global]. *Ambio*, 46(1), 4-17.
- Rojas, M. M. (2013). La transnacionalización de la agricultura de exportación en México. *Geografia em Questão*, 6(2).
- Romero, A. (2014). Las empresas transnacionales y los países en desarrollo. *Tendencias*, 15(2), 58-89.
- Romero-Lankao, P., Smith, J. Davidson, D., Diffenbaugh, N., Kinney, P., Kirshen P., Kovacs P. y Villers L. (2014). North America. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects [Norteamérica. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte B: Aspectos regionales]. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, USA, pp. 1439-1498.
- Rosenzweig, C., Strzepek, K. M., Major, D. C., Iglesias, A., Yates, D. N., McCluskey, A. y Hillel, D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies [Recursos hídricos para la agricultura en un clima cambiante: estudios de caso internacionales]. *Global Environmental Change*, 14(4), 345-360.
- Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process [Medición relativa y su generalización en la toma de decisiones por qué las comparaciones por pares son fundamentales en las

matemáticas para la medición de factores intangibles en el proceso analítico jerárquico/red]. *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas*, 102(2), 251-318.

- SAGARPA (2016). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Programa especial de energía para el campo en materia de energía eléctrica de uso agrícola. Recuperado el 12 de enero de 2018 de: <https://www.gob.mx/sagarpa/acciones-y-programas/programa-especial-de-energia-para-el-campo-en-materia-de-energia-electrica-de-uso-agricola>
- Scott, A. J. (1998). *Regions and the world economy [Las regiones y la economía mundial]*. Oxford University Press.
- Secretaría de Desarrollo Económico Sustentable, Principales Sectores: Sector Agrícola, 2013, recuperado el 17 de agosto de 2017 de: [http://sde.guanajuato.gob.mx/index.php?option=com\\_content&task=view&id=61&Itemid=103](http://sde.guanajuato.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=103)
- SEDESOL (2015). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Subsecretaría de planeación, evaluación y desarrollo regional. México.
- SEDESOL (2017). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Subsecretaría de planeación, evaluación y desarrollo regional. México.
- Seddon, N., Turner, B., Berry, P., Chausson, A., & Girardin, C. A. (2019). Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science [Aterrizando las soluciones climáticas basadas en la naturaleza en sentido de la ciencia de la biodiversidad]. *Nature Climate Change*, 9, 84-87.
- Shah, T., Burke, J. y Villholth, K.G. 2007. Groundwater: A global assessment of scale and significance. In Molden, D. (ed.) *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agricultura [Agua para alimentos, agua para la vida: una evaluación integral de la gestión del agua en la agricultura]*. (pp. 395-423). Londres: Earthscan, y Colombo: International Water Management Institute.

- Shepsle, K. A. (1989). Studying institutions: some lessons from the rational choice approach [Estudio de instituciones: algunas lecciones desde la aproximación de elección racional]. *Journal of theoretical politics*, 1(2), 131-147.
- SIAP (2017). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 3 de junio de 2018 de: [http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos\\_a.php](http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php)
- Spangenberg, J. H. (2011). Sustainability science: a review, an analysis and some empirical lessons [Ciencia de la sostenibilidad: una revisión, un análisis y algunas lecciones empíricas]. *Environmental Conservation*, 38(3), 275-287.
- Steffen, W., Andreae, M. O., Bolin, B., Cox, P. M., Crutzen, P. J., Cubasch, U. y Turner, B. L. (2004). Abrupt changes: the Achilles' heels of the Earth System [Cambios abruptos: los talones de Aquiles del sistema terrestre]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 46(3), 8-20.
- Steffen, W., Crutzen, P. J. y McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature [El Antropoceno: son los humanos que ahora abruma a las grandes fuerzas de la naturaleza]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(8), 614-621.
- Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., ... y Molina, M. (2011). The Anthropocene: from global change to planetary stewardship [El Antropoceno: del cambio global a la administración planetaria]. *Ambio*, 40(7), 739.
- Stern, N. H. (2006). *Stern Review: The economics of climate change [Informe Stern: La economía del cambio climático]*. (Vol. 30). London: HM treasury.
- Stocker, T.F., Qin, G.-K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.). IPCC (2013): Resumen para responsables de políticas. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices [Impactos ambientales globales de la expansión agrícola: la necesidad de prácticas sostenibles y eficientes]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5995-6000.

- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices [Sostenibilidad agrícola y prácticas intensivas de producción]. *Nature*, 418(6898), 671.
- Tudela, F. (1992). *La modernización forzada del trópico: El caso de Tabasco, proyecto integrado del Golfo* (No. 338.9726 T8).
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martellog, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A. y Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science [Un marco para el análisis de vulnerabilidad en ciencia de la sostenibilidad]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079.
- Val-Segura, R. y Arriaga-Medina, J. (2015). Water resources management and sustainability in Mexico [Gestión de recursos hídricos y sostenibilidad en México]. En: *Sustainability of integrated water resources management* (pp. 87-100). Springer, Cham.
- Van der Kooij, S., Zwarteveen, M., Boesveld, H., y Kuper, M. (2013). The efficiency of drip irrigation unpacked [La eficiencia del riego por goteo al descubierto]. *Agricultural Water Management*, 123, 103-110.
- Van der Leeuw, S. (2010). The archaeology of innovation: lessons for our times [La arqueología de la innovación: lecciones para nuestros tiempos]. *Innovation: perspectives for the 21st century*, 33-53.
- Vickers, J. (1992). Comparing disciplinary and interdisciplinary claims: How much discipline? [Comparación de reivindicaciones disciplinarias e interdisciplinarias: ¿Cuánta disciplina?] *Association for Canadian studies working document on interdisciplinarity*, vol. 10.
- Voß, J. P., y Bornemann, B. (2011). The politics of reflexive governance: challenges for designing adaptive management and transition management [Las políticas de la gobernanza reflexiva: retos para el diseño de manejo adaptativo y el manejo de transición]. *Ecology and Society*, 16(2).
- Wester, P. y Hoogesteger van Dijk, J. (2009). *Uso Intensivo y Despojo del Agua Subterránea: Hacia una Conceptualización de los Conflictos y la Concentración del Acceso al Agua Subterránea*. Justicia hídrica. Cusco, Perú.

- Wester, P. y Hoogesteger van Dijk, J. (2011). Uso Intensivo y Despojo del Agua Subterránea: Hacia una conceptualización de los conflictos y la concentración del acceso al agua subterránea. En: Boelens, R., L. Cremers y M. Zwarteveen (2011). Justicia hídrica. Acumulación, conflicto y acción social, cap. 7, pp. 111-133. Lima: Instituto de Estudios Peruanos, fondo editorial PUCP.
- Wester, P., Sandoval, M. R., y Hoogesteger van Dijk, J. (2011). Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, Mexico [Evaluación del desarrollo de los consejos de gestión de acuíferos (COTAS) para la gestión sostenible de las aguas subterráneas en Guanajuato, México]. *Hydrogeology Journal*, 19(4), 889-899.
- Westley, F., Olsson, P., Folke, C., Homer-Dixon, T., Vredenburg, H., Loorbach, D. y Banerjee, B. (2011). Tipping toward sustainability: emerging pathways of transformation [Inclinándonos hacia la sostenibilidad: vías emergentes de transformación]. *Ambio*, 40(7), 762.
- World Water Assessment Programme (2009). *World water development report 3: Water in a changing world [Informe sobre el desarrollo mundial del agua 3: El agua en un mundo cambiante]*. UNESCO, Paris y Londres: Earthscan.
- Yeomans, P. A. (1973). *Water for every farm: a practical irrigation plan for every australian property [Agua para cada granja: un plan práctico de irrigación para cada propiedad australiana]*. Murray Publishing Company, Pty, Ltd, Sydney, Australia.