



6

Recursos hídricos

Sebastián Vicuña (Chile), Luis M. Barranco (España),
Carlos Berroeta (Chile), Jose A. Marengo (Brasil), Paula Pacheco (Bolivia),
Joel Pérez-Fernández (Panamá), Freddy Picado (Panamá),
Manuel Pulido-Velazquez (España), Christopher A. Scott (EE. UU./
México), Rossana Scribano (Paraguay) y Javier Tomasella (Brasil).

Se recomienda citar este texto como:

Vicuña, S., L.M. Barranco, C. Berroeta, J.A. Marengo, P. Pacheco, J. Pérez-Fernández, F. Picado, M. Pulido-Velazquez, C.A. Scott, R. Scribano y J. Tomasella, 2020: Recursos Hídricos. En: *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos - Informe RIOCCADAPT* [Moreno, J.M., C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo Buendía, J.A. Marengo y U. Oswald Spring (eds.)]. McGraw-Hill, Madrid, España (pp. 199-236, ISBN: 9788448621643).

... CONTENIDO

Resumen ejecutivo	202
6.1. Introducción.....	202
6.1.1. Marco conceptual del capítulo.....	202
6.1.2. Principales cifras del sector o sistema.....	203
6.1.3. Relación del sector o sistema con clima y con cambio climático.....	204
6.1.4. Revisión de informes previos del IPCC y otros informes relevantes.....	205
6.2. Componentes del riesgo asociado a los recursos hídricos y el cambio climático.....	205
6.2.1. Vulnerabilidad y exposición.....	205
6.2.2. Amenazas asociadas al cambio climático.....	206
6.3. Caracterización de los riesgos del cambio climático y sus impactos sobre los recursos hídricos.....	207
6.4. Medidas de adaptación.....	207
6.4.1. Opciones de adaptación.....	207
6.4.2. Actividades de adaptación planificada.....	209
6.4.3. Actividades de adaptación autónoma.....	209
6.5. Barreras, oportunidades e interacciones.....	209
6.6. Medidas o indicadores de la efectividad de la adaptación.....	210
6.7. Casos de estudio.....	210
6.7.1. Combinación de sistemas de apoyo a la decisión y talleres participativos para el diseño de medidas de adaptación en la demarcación hidrográfica del Júcar (España).....	211
6.7.1.1. Resumen.....	211
6.7.1.2. Introducción a la problemática del caso.....	211
6.7.1.3. Descripción del caso.....	212
6.7.1.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	213
6.7.2. Electricidad para el uso de agua subterránea en México: oportunidades y limitaciones para la respuesta de adaptación al cambio climático.....	214
6.7.2.1. Resumen.....	214
6.7.2.2. Introducción a la problemática del caso.....	214
6.7.2.3. Descripción del caso.....	214
6.7.2.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	216
6.7.3. Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá.....	217
6.7.3.1. Resumen.....	217
6.7.3.2. Introducción a la problemática del caso.....	217
6.7.3.3. Descripción del caso.....	217
6.7.3.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	219
6.7.4. Energía fotovoltaica para la extracción de agua para bebederos de camélidos en el municipio de Turco, Bolivia.....	220
6.7.4.1. Resumen.....	220
6.7.4.2. Introducción a la problemática del caso.....	220
6.7.4.3. Descripción del caso.....	220
6.7.4.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	221
6.7.5. Adaptación a la variabilidad y el cambio climático a través de la captación y almacenamiento de agua de lluvia en la Cooperativa Chortitzer en el Chaco Central en Paraguay.....	221

6.7.5.1. Resumen.....	221
6.7.5.2. Introducción a la problemática del caso.....	221
6.7.5.3. Descripción del caso.....	222
6.7.5.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	223
6.7.6. Cambios en la operación del sistema Cantareira para hacer frente a las crisis hídricas en la Región Metropolitana de São Paulo (Brasil)	224
6.7.6.1. Resumen.....	224
6.7.6.2. Introducción a la problemática del caso.....	224
6.7.6.3. Descripción del caso.....	225
6.7.6.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	226
6.7.7. Desarrollo de infraestructura resiliente a los impactos del cambio climático en la provisión de agua potable en la ciudad de Santiago de Chile	226
6.7.7.1. Resumen.....	226
6.7.7.2. Introducción a la problemática del caso.....	226
6.7.7.3. Descripción del caso.....	227
6.7.7.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas.....	228
6.8. Principales lagunas de conocimiento y líneas de acción prioritarias	230
6.9. Conclusiones	230
Preguntas frecuentes	231
Agradecimientos.....	231
Bibliografía.....	231

Resumen ejecutivo

Existe una heterogénea distribución de los recursos hídricos disponibles en la región. América Central y Sudamérica son regiones con una alta disponibilidad promedio de recursos hídricos, pero distribuidos de manera heterogénea dentro de la región y en el interior de cada país. La cantidad de recursos en términos de la disponibilidad per cápita es muy distinta entre países, siendo cercana al límite de estrés hídrico en algunos de ellos (especialmente en el Caribe y la Península Ibérica). Pese a que se practica de manera prioritaria la agricultura de secano, el principal usuario del agua en la región es la agricultura, con valores cercanos al 70 % del uso de agua total, llegando en algunos casos a representar más del 90 % de los recursos. El uso para generación de hidroelectricidad es un factor relevante en la región en comparación con otras regiones del mundo. Pese a mejoras de acceso a agua potable en las zonas urbanas, el acceso a agua potable en las zonas rurales sigue siendo un desafío importante en muchos países de la región.

La principal amenaza a los recursos hídricos es el cambio en los patrones de precipitación. En este sentido se espera con alto nivel de consistencia entre modelos una reducción de disponibilidad de recursos en algunas zonas de la región, como México, Centroamérica y el Caribe, el Nordeste de Brasil, la región Andino-Pacífico Central, la Patagonia y la Península Ibérica. Hay evidencias también de cambios en la estacionalidad de precipitaciones y por ende de disponibilidad de recursos. El aumento de la temperatura acelera el derretimiento de nieves y glaciares, alterando la temporalidad y cantidad de caudales. Eventos extremos y cambios en la calidad de aguas son también una amenaza.

Los principales riesgos asociados al cambio climático son la reducción y cambios en la disponibilidad de recursos, producto de modificaciones en las precipitaciones y temperaturas. Esto afecta a la posibilidad de uso de recursos para fines productivos, la conservación de los ecosistemas y el sostenimiento de los medios de vida. Los cambios en la estacionalidad afectan al uso de recursos especialmente donde no existe capacidad de almacenamiento o de regulación de los mismos. Los eventos extremos y el deterioro de la calidad de agua afectan al uso de la infraestructura que permite el acceso al agua, especialmente en sistemas de provisión de agua para la población.

Existen experiencias en distintos lugares de la región respecto a la adaptación a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. Una experiencia importante corresponde al suministro de agua en comunidades rurales teniendo en cuenta sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia. Se están diseñando también planes de adaptación enfocados en los recursos hídricos a escalas nacionales, regionales y locales que incluyen escenarios climáticos futuros y medidas de adaptación para hacer frente a estos impactos. Existen experiencias en el cambio de protocolos de diseño y operación de infraestructuras de suministro de agua potable para hacer frente a escenarios de cambio climático.

Existen barreras, oportunidades y desafíos para lograr una adecuada adaptación a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Una barrera importante es la ausencia en muchos casos de información a la escala adecuada para poder diseñar medidas de adaptación. Otra barrera son los incentivos mal orientados respecto del nexo agua, energía y alimentos que pueden generar casos de maladaptación. El uso de herramientas para la toma de decisiones permite evaluar los beneficios y costos asociados a la implementación de medidas de adaptación. La planificación y colaboración a todas las escalas (comunidad, cuenca y país) es clave para definir estrategias exitosas.

Para mejorar la capacidad de adaptación en el sector, se requieren una serie de líneas de acción prioritarias. Hay que trabajar en mejorar los diseños institucionales para que permitan incorporar de manera más simple las medidas de adaptación. Igualmente, se precisan mejores herramientas para hacer una evaluación de las necesidades de adaptación.

6.1. Introducción

6.1.1. Marco conceptual del capítulo

El énfasis de este capítulo es tratar los impactos del cambio climático sobre el sector o sistema de los recursos hídricos (en el contexto que se trata en este capítulo). En específico, se tratan aquellos impactos asociados a la disponibilidad de recursos hídricos. Los impactos asociados a la ocurrencia de eventos extremos, como inundaciones o deslizamientos en masa, se abordan en otros capítulos del libro (**Capítulos 10 y 11**, respectivamente). Por otra parte, los efectos que ocurren en términos de la posibilidad de acceder a los recursos hídricos en cantidades adecuadas también tienen consecuencias posteriores en muchos sistemas (comunidades, sectores productivos, ecosistemas), que también son tratados de manera complementaria en otros capítulos. Muchos de estos impactos y las medidas de adaptación asociadas son tratados en distintos capítulos de este libro (p. ej., el **Capítulo 7**, dedicado a los recursos agropecuarios). Se hacen referencias cruzadas donde corresponde.

Para caracterizar los riesgos y, posteriormente, las necesidades de medidas de adaptación, se presenta un marco conceptual de trabajo basado en la seguridad hídrica y los servicios ecosistémicos. Este marco conceptual permite reconocer, por una parte, la manera en que el cambio climático puede afectar a la disponibilidad de recursos hídricos y a la seguridad hídrica, y por otra, la manera en que distintas medidas de adaptación pueden ayudar al objetivo de lograr la seguridad hídrica (Ocampo-Melgar *et al.*, 2016). Este marco conceptual se presenta en la **Figura 6.1** y reconoce primero en su base el objetivo de seguridad hídrica, considerando al agua como un recurso para asegurar los medios de vida humana, el desarrollo socioeconómico y la conservación de los ecosistemas. La provisión de los recursos que se necesitan para este objetivo surge como una conjunción de las



condiciones climáticas (precipitación y temperatura, principalmente), biogeográficas (ecosistemas, cobertura vegetal, relieve) y la presencia de obras de infraestructura que permitan la regulación, afianzamiento, distribución y tratamiento de los recursos. También surge como factor relevante la existencia de instituciones y una gobernanza adecuada que permitan una correcta asignación del agua y que sean capaces de resolver problemas de competencia y conflictos entre usuarios, entre otros aspectos.

6.1.2. Principales cifras del sector o sistema

En la **Tabla 6.1** se presentan algunas cifras que ayudan a describir la disponibilidad y uso de recursos hídricos en Iberoamérica. Estas métricas se han preparado para todos los países de la RIOCC, separándolos en cuatro grupos: Península Ibérica (España y Portugal), América del Sur, América Central y México y los países del Caribe hispanohablante (Cuba y República Dominicana). Existe un traslape de esta manera con la división regional presentada en el **Capítulo 1**. La fuente de información para preparar estas métricas es la base de datos Aquastat de la FAO. La disponibilidad de información en esta base de datos es disímil entre los países en términos de periodicidad y momento de recolección de la información. En aquellos casos (debidamente indicados en la tabla) en que el año no es el mismo para todos los países, se ha escogido el más reciente de los presentados en la base

datos. Algunos de los países de la región cuentan con información más detallada, específica y actualizada respecto de estas cifras, pero se ha escogido la fuente Aquastat para tener una información lo más homogénea posible.

Se aprecia en la **Tabla 6.1** que existen diferencias importantes en la disponibilidad de recursos hídricos per cápita, tanto a nivel de promedio de grupo de países como diferencias dentro de cada grupo. En particular, se observa que América Central y del Sur son regiones con una alta disponibilidad promedio de recursos hídricos, pero distribuidos de manera heterogénea (Magrin et ál., 2014). Se aprecia que en algunos países la condición de disponibilidad se encuentra en los límites de estrés hídrico (disponibilidades menores a 1.700 m³/cap/año (Falkenmark, 1989), especialmente en el Caribe y la Península Ibérica. En términos del uso de estos recursos, principal característica que da cuenta de la exposición en este sector, el principal usuario del agua en la región es la agricultura, con valores cercanos al 70 % del uso de agua total, llegando en algunos casos a representar

más del 90 % de los recursos. En la gran mayoría de los países, el segundo usuario del agua es la población y el tercero, la industria. Respecto del uso de agua para la población, se puede apreciar que la región ha mejorado bastante en cuanto al acceso a agua potable, existiendo una cobertura promedio sobre el 90 % en el año 2015. Esto representa un cambio importante en algunas regiones donde, por ejemplo, en 1992 el promedio era levemente superior al 40 %, pero las cifras indican que todavía existe una parte importante de la población sin acceso apropiado a agua potable. Se aprecia también que todavía queda espacio por mejorar en cuanto al acceso al agua en zonas rurales, siendo este un desafío importante para la región (con excepción del caso de la Península Ibérica, donde pareciera estar mejor resuelto el problema). Respecto del uso de agua para procesos productivos, se presenta en la **Tabla 6.2** la participación de la hidroelectricidad en la generación de electricidad para distintas regiones, de acuerdo con la base de datos del Banco Mundial. Se puede destacar que en todas las regiones la participación relativa ha ido disminuyendo con el tiempo. Si bien en Latinoamérica dicha participación es todavía significativamente superior a la global (46 % vs. 16 %), en la Península Ibérica es similar (con un valor del 17 %). Esta alta participación implica que la matriz de generación de electricidad tiene una menor huella de carbono y se manifiesta de manera especial en algunos casos de América del Sur y América Central. Por ejemplo, en Brasil y Costa Rica la participación es de un 62 % y un 74 %, respectivamente.

Finalmente, para poder mostrar la presión hídrica o la relación que existe entre la disponibilidad de recursos y su demanda,

Tabla 6.1. Información de distintos indicadores que reflejan las condiciones de disponibilidad hídrica y uso de los recursos hídricos en los países de la RIOCC. Promedio hace referencia al promedio de los valores de los países de cada una de las regiones. Mínimo hace referencia al valor mínimo observado entre los países de cada una de las regiones (entre paréntesis se indica cuál es dicho país). Máximo hace referencia al valor máximo observado entre los países de cada una de las regiones (entre paréntesis se indica cuál es dicho país). *Nota:* la información para algunas métricas en la base de datos de Aquastat difiere en cuanto al año en que el dato es capturado. «Año más reciente» se refiere a que se utiliza el último año con datos disponibles de la muestra de cada país a fecha de elaboración del informe. Esos años típicamente tienden a estar ubicados en la década de 2000. *Fuente:* información tomada de la base de datos de Aquastat de la FAO (FAO-Aquastat, 2019).

Métrica		Año [1]	Valor entre países	Península Ibérica	América del Sur	América Central y México	Caribe		
Disponibilidad de recursos hídricos per cápita (m ³ /hab/año)		2014	Promedio	4.948	45.417	16.167	2.790		
			Mínimo	2.418 (España)	20.181 (Argentina)	3.637 (México)	2.232 (R. Dom.)		
			Máximo	7.478 (Portugal)	59.916 (Perú)	35.454 (Panamá)	3.347 (Cuba)		
Extracciones como porcentaje de extracciones totales (%)	Agricultura	Año más reciente	Promedio	71	77	64	72		
			Máximo	79 (Portugal)	92 (Bolivia)	77 (Nicaragua)	80 (R. Dom.)		
	Industria		Promedio	17	8	9	9		
			Máximo	21 (España)	19 (Colombia)	18 (Guatemala)	11 (Cuba)		
	Agua potable		Promedio	11	15	27	18		
			Máximo	15 (España)	27 (Colombia)	56 (Panamá)	24 (Cuba)		
Población con acceso a agua potable segura (%)	Total	1992	Promedio	98	83	80	44		
		2015		100	94	93	90		
	Rural	1992		98	58	65	38		
		2015		100	84	86	86		
	Urbana	1992		99	93	94	63		
		2015		100	97	98	91		
	Extracción de agua como porcentaje de disponibilidad de recursos renovables (%)			Año más reciente	Promedio	22,4	1,7	5	21,7
					Mínimo	11,8 (Portugal)	0,4 (Bolivia)	0,7 (Panamá)	13 (Cuba)
Máximo			33 (España)		4,3 (Argentina)	18,6 (México)	30,4 (R. Dom.)		

Tabla 6.2. Participación de la hidroelectricidad en la generación de electricidad (%). *Fuente:* Banco Mundial (2019).

Región	1980	1990	2000	2010	2014
América Latina y el Caribe	59	63	59	52	47
Península Ibérica	30	19	15	17	17
Mundo	18	18	17	16	16

se presenta en la **Tabla 6.1** la métrica que mide la proporción entre la extracción sobre la disponibilidad de recursos. Nuevamente se aprecia que, a nivel promedio, la presión hídrica es importante en la Península Ibérica, el Caribe y en algunos países de Latinoamérica (p. ej., México). Esta presión hídrica tiene efectos en la disponibilidad de recursos, pero también en la posible sobreexplotación de acuíferos y en la calidad de los ecosistemas acuáticos. Es importante destacar que los valores presentados son promedios calculados a nivel de país y región. En muchos de estos países (p. ej., Chile) la alta variabilidad espacial en la disponibilidad y uso de los

recursos hídricos hace que el promedio sea un mal reflejo de la situación que puede ocurrir a escalas espaciales más reducidas.

6.1.3. Relación del sector o sistema con clima y con cambio climático

Muchos de los impactos del cambio climático se manifiestan principalmente a través de la relación que tiene el clima con distintos componentes del ciclo hidrológico. Los impactos pueden ser diversos: cambios en los patrones de precipitación, ya sea en términos de frecuencia, tipo (líquida o sólida) o intensidad. Estos cambios pueden alterar la evapotranspiración, la cantidad de humedad en el suelo, la escorrentía, los caudales de los ríos y la recarga de acuíferos. Esto genera finalmente cambios en la disponibilidad de agua, así como también la ocurrencia de eventos extremos. Estas variaciones en el clima también pueden generar cambios en las necesidades que tienen los seres vivos y los procesos productivos de utilizar agua para su correcto funcionamiento.

6.1.4. Revisión de informes previos del IPCC y otros informes relevantes

En el análisis de amenazas, vulnerabilidad y medidas de adaptación en los recursos hídricos en la región se han revisado principalmente los siguientes capítulos del Quinto Informe del IPCC: (a) «Freshwater resources» (Jiménez *et ál.*, 2014); (b) «Europe» (Kovats *et ál.*, 2014); (c) «North America» (Romero-Lankao *et ál.*, 2014), y (d) «Central and South America» (Magrin *et ál.*, 2014). La información relevante de estos capítulos se ha complementado con bibliografía que se ha publicado con posterioridad al Quinto Informe del IPCC y experiencias prácticas en medidas de adaptación que se recopilan desde distintas fuentes.

6.2. Componentes del riesgo asociado a los recursos hídricos y el cambio climático

6.2.1. Vulnerabilidad y exposición

La vulnerabilidad de los sistemas de recursos hídricos se puede definir a través de varios factores que determinan el logro o fracaso de sostener objetivos de seguridad hídrica

(agua en cantidades y con calidad adecuada y oportunidad para el desarrollo productivo, sostén de los medios de vida y protección de los ecosistemas). La reducción o pérdida de seguridad hídrica se puede deber a algunos de los siguientes factores:

- Disminución física de la oferta de agua (sequías).
- Aumento en la demanda.
- Mala calidad del agua que impide su uso.
- Mayor recurrencia de eventos extremos.
- Infraestructura limitada que impide o limita su acceso.
- Gobernanza, instituciones (reglas, organismos) poco eficientes para asegurar la gestión adecuada del recurso hídrico.
- Desarrollo limitado de la ciencia, la tecnología y la innovación.

Como se destacaba en la sección anterior, existen diferencias importantes en Iberoamérica respecto de algunos de los elementos de base que caracterizan esta vulnerabilidad y exposición, ya sea en la disponibilidad física del recurso, la demanda que se hace de él y las capacidades en infraestructura e institucionales. Respecto del primer punto, es importante destacar que, pese a que en condiciones promedio la disponibilidad espacial de recursos es relativamente alta, esta se encuentra heterogéneamente distribuida. Esto se puede apreciar de manera gráfica en la **Figura 6.2**.

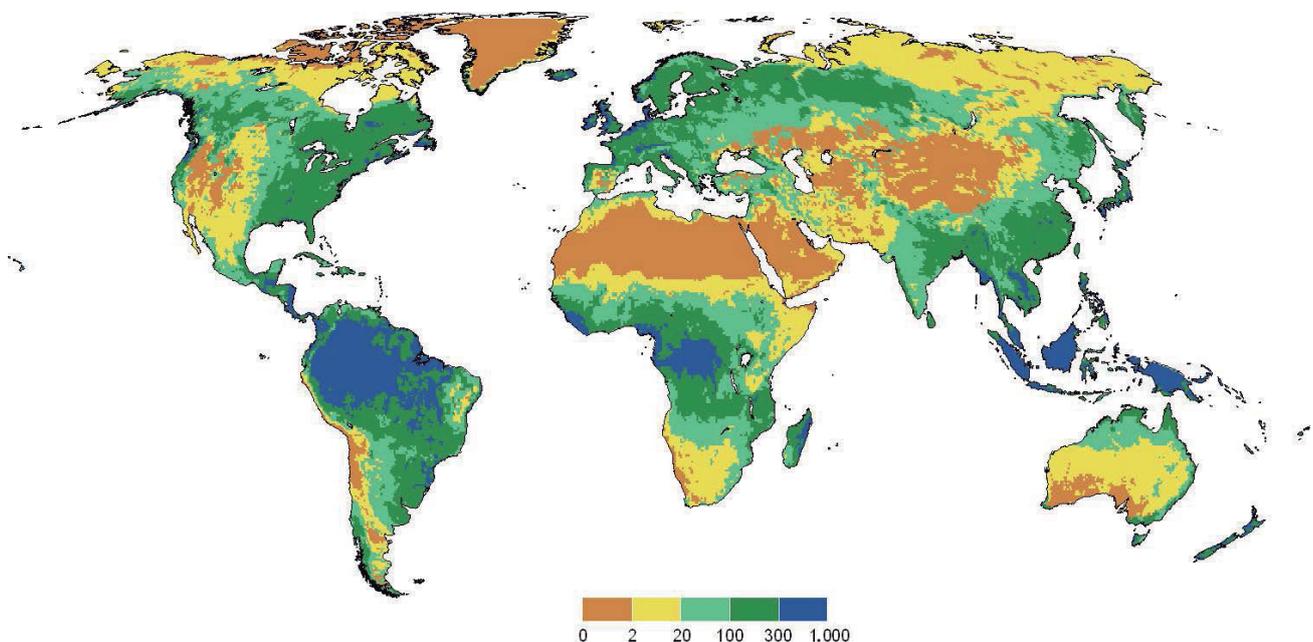


Figura 6.2. Recursos hídricos renovables en mm/año (1961-1990). Fuente: Döll y Fiedler, 2008.

6.2.2. Amenazas asociadas al cambio climático

La principal amenaza asociada al cambio climático tiene relación con la disminución de precipitación y el consecuente aumento de sequía. Como se presenta con mayor detalle en el **Capítulo 1**, se puede apreciar de manera espacial que las reducciones en la precipitación tienden a estar concentradas en algunas regiones específicas, cubriendo gran parte de la Península Ibérica, Mesoamérica, el norte de América del Sur, la zona central de la cuenca del Amazonas, parte del Nordeste de Brasil y gran parte del Cono Sur, cubriendo la zona central de Chile y sur de Argentina. Se aprecia, además, que los cambios proyectados son muy robustos en algunas de estas regiones (p. ej., la zona central de Chile, sur de Argentina y la Península Ibérica). Por otra parte, se muestra

que hay regiones donde las proyecciones indican aumentos en los niveles de precipitación, como en la cuenca del río de la Plata. Finalmente, hay regiones que se caracterizan por presentar altos niveles de incertidumbre respecto de la señal de cambio en las precipitaciones, como es el caso de Bolivia, Paraguay y parte de las cabeceras de la cuenca del Amazonas. Adicionalmente, a los cambios en los montos totales de precipitación es importante añadir las variaciones en la temporalidad de los eventos de lluvia. Estudios como los de Aguilar *et ál.* (2005) muestran cómo es posible que sin haber cambios en los montos totales de precipitación puedan existir cambios en la manera en que se distribuye la precipitación a lo largo del tiempo. Estos efectos son especialmente relevantes en contextos donde haya poca capacidad (natural o artificial) de regulación de estos montos de agua para asegurar niveles constantes de disponibilidad de recursos hídricos. Finalmente, se aprecia que para toda la región

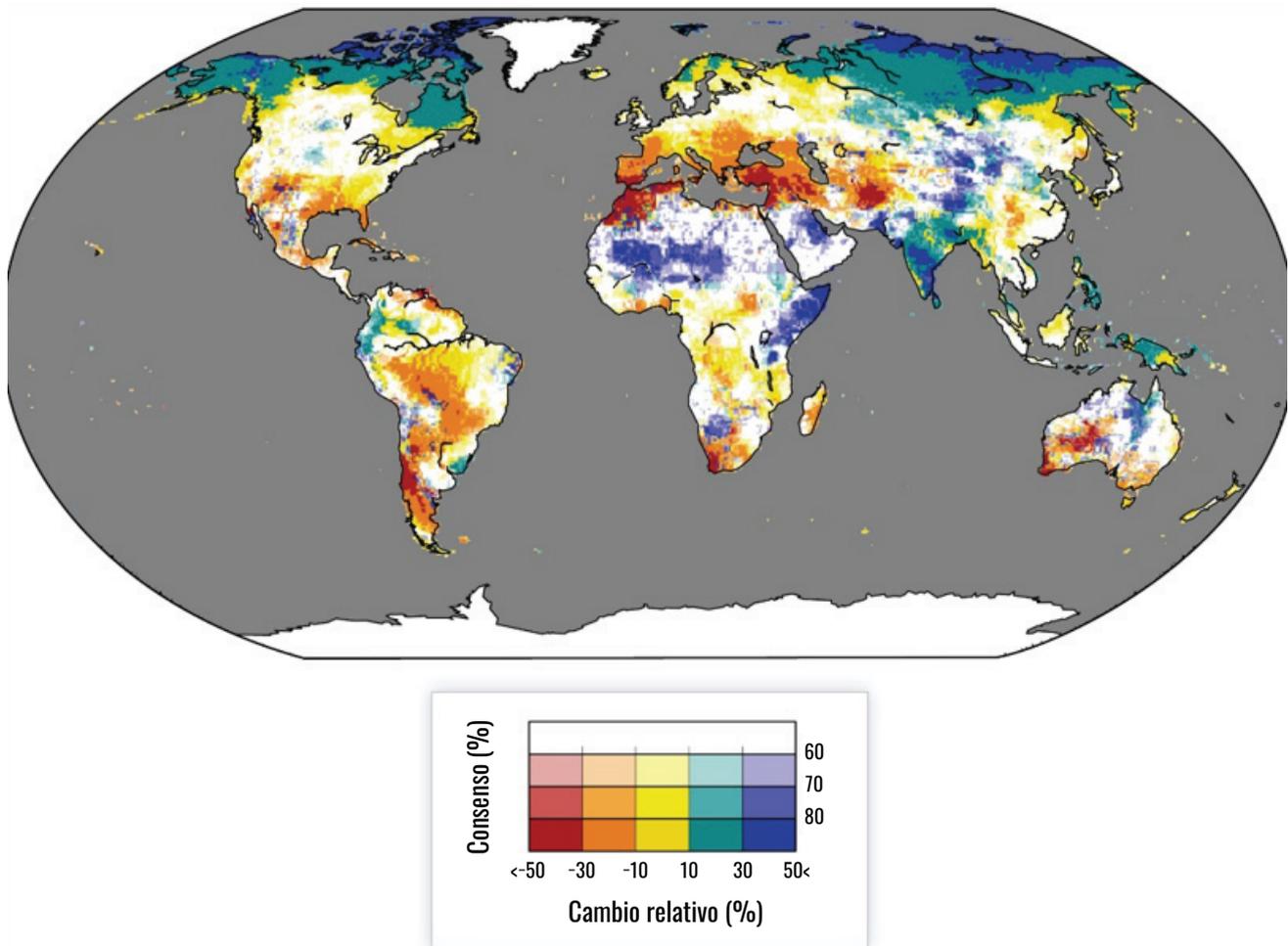


Figura 6.3. Porcentaje de cambio en el caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2 °C sobre el promedio del periodo 1980-2010 (2,7 °C sobre el periodo preindustrial). *Nota:* los colores muestran el cambio promedio, considerando 5 GCM y 11 modelos hidrológicos globales (GHM), y la intensidad en el color muestra el nivel de consenso en el signo del cambio proyectado, considerando las combinaciones de 55 GHM-GCM (porcentaje de simulaciones que están de acuerdo en el signo de cambio promedio). *Fuente:* Jiménez *et ál.* (2014).

considerada se proyecta también un aumento en los niveles de temperatura (no se muestran) que acentúan los cambios en la precipitación, como se explica más adelante.

Los cambios de precipitación observados/proyectados (para más detalles ver **Capítulo 1**) se traducen en cambios en los caudales y disponibilidad de recursos hídricos. Los patrones de cambios, en términos de la dirección del cambio (positiva o negativa), son similares, tal como se puede apreciar en la **Figura 6.3**. Sin embargo, se puede ver que las magnitudes son mayores, producto del efecto combinado de una disminución de la precipitación con un aumento de temperaturas y su efecto en evapotranspiración.

Algunos de estos impactos ya están siendo observados de acuerdo con varias publicaciones presentadas en el AR5 y con posterioridad. Por ejemplo, se han observado reducciones de los caudales de los ríos en el sur de Europa (Stahl *et ál.*, 2010), en Colombia (Carmona y Poveda, 2014), en algunas zonas de México (Romero-Lankao, 2010; Sosa-Rodríguez, 2010), en algunos ríos en Centroamérica y en el centro y sur de Chile y Argentina (Seoane y López, 2007; Urrutia *et ál.*, 2011; Cortes *et ál.*, 2011; Vicuña *et ál.*, 2013). Estos cambios están generados principalmente por una reducción en las precipitaciones, y se ven acentuados por los efectos que los aumentos en la temperatura generan sobre la criósfera (glaciares y nieve) en zonas cordilleranas, especialmente en la cordillera de los Andes. El retroceso de glaciares en los Andes tropicales se ha acentuado (Rabatel *et ál.*, 2013; Vuille *et ál.*, 2018) y la extensión del manto nival ha disminuido, generando cambios en la estacionalidad de los caudales, reduciendo flujos en la estación seca y aumentándolos en la estación húmeda (Pizarro *et ál.*, 2014; Vicuña *et ál.*, 2013). Se espera que en el futuro estos impactos sigan aumentando, alterándose los caudales en algunos de los principales ríos de estas regiones (Sousa *et ál.*, 2011; Gao y Giorgi, 2008; CONAGUA, 2011; Martínez Austria y Patiño Gómez, 2010; Maurer *et ál.*, 2009; Imbach *et ál.*, 2012; Vicuña *et ál.*, 2011).

6.3. Caracterización de los riesgos del cambio climático y sus impactos sobre los recursos hídricos

Estos cambios hidrológicos estarían afectando a varios componentes de la seguridad hídrica en la región; por ejemplo, a la disponibilidad de agua para los habitantes de grandes urbes, como Ciudad de México (Romero-Lankao, 2010) o Santiago de Chile (ECLAC, 2009; Bonelli *et ál.*, 2014; Meza *et ál.*, 2014), o para los habitantes de ciudades intermedias o incluso de pequeñas comunidades rurales ubicadas en zonas altamente vulnerables (Salinas *et ál.*, 2016; Drenkhan *et ál.*, 2015; Marengo *et ál.*, 2017). Estos cambios también

podrían afectar a la disponibilidad de agua para dos actividades productivas muy relevantes para la región, como son la agricultura, especialmente aquella ubicada en zonas semiáridas (Souza *et ál.*, 2010; Montenegro y Ragab, 2010; Vicuña *et ál.*, 2011; Herrera-Pantoja y Hiscock, 2015; Vicuña *et ál.*, 2012 y 2015; Fader *et ál.*, 2016; Núñez *et ál.*, 2017), y la generación de hidroelectricidad (Maurer *et ál.*, 2009; Seoane y López, 2007; Ospina Noreña *et ál.*, 2011; McPhee *et ál.*, 2010; Solaun y Cerdá, 2017). No existen muchos estudios respecto a impactos sobre los ecosistemas acuáticos, pero es de esperar que el aumento de la demanda de recursos hídricos y los cambios en su disponibilidad vayan a aumentar la presión sobre estos ecosistemas (p. ej., Iglesias *et ál.*, 2017; Vicuña *et ál.*, 2014). Finalmente, es importante destacar que la disponibilidad de recursos hídricos también se ve afectada por problemas de calidad de las aguas, que a su vez puede verse afectada por el cambio climático. Ejemplos que muestran este tipo de impactos son los efectos de alza de la temperatura o extremos climáticos en las condiciones biológicas y presencia de contaminantes en las aguas (p. ej., ver los estudios de Jimenez *et ál.*, 2018 en ciudades de México o de Fortner *et ál.*, 2011 sobre la exposición a contaminantes que se produce por el retroceso de glaciares).

6.4. Medidas de adaptación

Para hacer frente a los impactos antes descritos, se deben implementar una serie de medidas de adaptación. En esta sección se describen algunas de las opciones existentes y las actividades de adaptación que se están implementando de manera planificada y autónoma. En una sección posterior se tratan temas transversales, como las barreras, oportunidades e interacciones para la adaptación y las medidas o indicadores de la efectividad de la adaptación.

6.4.1. Opciones de adaptación

Las medidas de adaptación pueden caracterizarse de distintas maneras, siguiendo el marco conceptual presentado al inicio de este capítulo (**Figura 6.1**).

Una síntesis de las medidas descritas en estos apartados introductorios y posteriormente en los casos de estudios prácticos se presentan en la **Tabla 6.3**. Como se aprecia en esta tabla, hay diversas maneras en que se pueden caracterizar estas medidas. Hay medidas que se orientan a mejorar la provisión del recurso, así como a mejorar su gestión. Respecto de la primera categoría, podemos encontrar ejemplos, como mejoras en las herramientas e información clave para la caracterización de las condiciones climáticas (actuales y futuras) (ver el **caso de estudio 6.7.1**), o mejoras en el diseño, evaluación y operación de la infraestructura física (ver los **casos de estudio 6.7.6** y **6.7.7**) o natural, como es la protección de los ecosistemas que proveen los servicios de regulación y provisión de recursos hídricos (ver casos de estudio del **Capítulo 3**). Respecto del segundo

Tabla 6.3. Ejemplos de medidas de adaptación implementadas en países de la RIOCC relacionadas con los recursos hídricos. Notas: [1] escala de aplicación: nacional, regional (departamento o cuenca), local (urbano, ciudad o rural); [2] objetivos: sostener los medios de vida, el desarrollo socioeconómico o la conservación de los ecosistemas; [3] relación con la seguridad hídrica: provisión (regulación de recursos u oferta) vs. necesidad (demanda). Fuente: elaboración propia.

Tipo de medida	Ejemplos	Referencias	Escala de aplicación [1]	Objetivo de seguridad hídrica [2]	Elemento de ciclo de RR HH [3]
Plan de adaptación con foco en recursos hídricos	Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá: 2015-2050 (Panamá)	Caso de estudio 6.7.3	Nacional, regional (departamento o cuenca) y local (urbano y rural)	Todos los objetivos	Provisión - necesidad
	Plan de adaptación de la cuenca del río Miaipo (Chile)	CCG (n.d.)			
	Planes municipales de adaptación al cambio climático (Nicaragua)	Álvarez y Gutiérrez (n.d.)			
	Programa Nacional de Atención a Sequías (México)	PRONACOSE (n.d.)			
	Plan de adaptación al cambio climático en el valle del Cauca (Colombia)	Departamento del valle del Cauca (2018).			
Herramientas de apoyo a la toma de decisiones	Plan de adaptación municipal hacia la seguridad hídrica: municipios de Guayabal y Tameyo (Rep. Dominicana) y Quetzaltenango y Santa Cruz Mullua (Guatemala)	CATHALAC (2015)	Regional (cuenca)	Todos los objetivos	Provisión - necesidad
	Combinación de sistemas de apoyo a la decisión y talleres participativos para el diseño de medidas de adaptación en la demarcación hidrográfica del Júcar (España)	Caso de estudio 6.7.1			
Reducción en necesidad de agua para agricultura	Uso eficiente de agua en arroz a través de la implementación del programa AMTEC (Colombia)	Caso de estudio 7.7.7	Nacional y regional	Desarrollo socioeconómico	Necesidad
Cosecha de aguas lluvia (captación y almacenamiento de aguas de lluvia)	TeSAC Cauca territorios sostenibles adaptados al clima (Colombia)	CGIAR (n.d.)	Local rural	Sostener medios de vida y desarrollo socioeconómico	Provisión
	Cosecha y almacenamiento de agua de lluvia para la producción y consumo en la Cooperativa Chortitzer, en el Chaco Central (Paraguay)	Caso de estudio 6.7.5			
	Reservorios para cosecha de agua lluvia (Honduras)	Gobierno de Honduras (n.d.)			
	Sistemas comunitarios de agua potable resilientes a los efectos del cambio climático (Ecuador)	Secretaría del Agua de Ecuador (n.d.)			
	Promoviendo la cosecha de agua lluvia como alternativa de adaptación al cambio climático y mejora de las condiciones de vida en el valle del Jiboa (El Salvador)	Fundación Nacional para el Desarrollo (n.d.)			
Producción de agua a través de consumo energía	Desalación de agua en Los Cabos (México)	Agua potable de Los Cabos (n.d.)	Local y local rural	Sostener medios de vida y desarrollo socioeconómico	Provisión
	Electricidad para el uso de agua subterránea (México)	Caso de estudio 6.7.2			
	Sistema de agua fotovoltaico para ganadería camélfida (Bolivia)	Caso de estudio 6.7.4			
Diseño de infraestructura de suministro de agua resiliente al cambio climático	Desarrollo de infraestructura resiliente a los impactos del cambio climático en la provisión de agua potable (Chile)	Caso de estudio 6.7.7	Nacional, local (urbano)	Todos los objetivos	Provisión
	Mejoramiento de la eficiencia en el uso del agua con la introducción de tecnologías para la adaptación (Cuba)	García (n.d.)			
Medidas basadas en ecosistemas	Restauración de páramos y humedales ubicados en zonas proveedoras de agua para el sistema de abastecimiento de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito	Aguirre et al. (2013)	Regional (cuenca), local (urbano)	Todos los objetivos	Provisión
	Adaptación al cambio climático en alta montaña	Conservación internacional (n.d.)			
Cambios de operación de infraestructura existente	Manejo de sequía en la cuenca del río São Francisco (Brasil)	Caso de estudio 10.7.3	Regional, cuenca	Desarrollo socioeconómico y sostener medios de vida	Provisión - necesidad
	Provisión de agua en la Región Metropolitana de São Paulo (Brasil)	Caso de estudio 6.7.6			

grupo, encontramos un número importante de medidas que apuntan a mejoras en cuanto a la eficiencia del uso, tomando en cuenta el objetivo que persiguen. Muy relevante en este caso son aquellas medidas que apuntan a crear una cultura del uso sostenible y eficiente del agua (ver casos de estudio del **Capítulo 7**).

Las medidas de adaptación también pueden caracterizarse en términos del objetivo de seguridad hídrica que persiguen, ya puede ser asegurar medios de vida humana, desarrollo socioeconómico o conservación de los ecosistemas. La revisión de la bibliografía que se presenta en el último informe del IPCC da cuenta de la implementación incipiente de algunos de los tipos de medidas descritas (Magrin *et ál.*, 2014; Romero-Lankao *et ál.*, 2014). Esta experiencia va aumentando en el tiempo, como se recoge en la bibliografía más reciente, en la que se estudian estrategias de adaptación en distintos componentes de la seguridad hídrica, como el agua para riego (p. ej., Kahil *et ál.*, 2015; Esteve *et ál.*, 2015; Chavez-Jimenez, 2015; Herwehe y Scott, 2018; Varela-Ortega *et ál.*, 2016; Fader *et ál.*, 2016), agua para sostener asentamientos humanos y medios de vida (p. ej., Bonelli *et ál.*, 2014; De Lira Azevêdo, 2017), agua para la generación eléctrica (p. ej., Khan *et ál.*, 2016) o agua para la protección de ecosistemas (p. ej., Iglesias *et ál.*, 2017). Esta acumulación de experiencia se aprecia también de manera práctica en los casos de estudio que se presentan en este y otros capítulos.

6.4.2. Actividades de adaptación planificada

La inclusión de medidas de adaptación de manera planificada y especialmente a largo plazo queda supeditada a los análisis que se realizan en planes o ejercicios de adaptación a nivel de cuencas, municipios o países completos. En este contexto, y teniendo en cuenta además carencias y fortalezas institucionales, surge con mucha fuerza la necesidad de realizar ejercicios de planificación en la gestión de recursos hídricos a distintas escalas. De esta manera aparece en distintos marcos institucionales la generación de planes de adaptación a una escala nacional, como el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias (MARN, 2017), y el Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá (ver **caso de estudio 6.7.3**); a escala de cuencas, de los que existen muchos ejemplos, como el caso de la cuenca del Júcar (ver el **caso de estudio 6.7.1**), o a escala de municipios o sectores económicos relacionados con el agua (p. ej., plan de adaptación de agricultura o energía). Estos procesos de planificación sirven también como ejercicios integradores que permiten, por una parte, definir escenarios y necesidades de adaptación y, por otra, determinar las distintas estrategias que pueden ser consideradas para cubrir estas necesidades. En el desarrollo de estos planes se han debido desarrollar herramientas de simulación y análisis especialmente diseñadas para representar distintos objetivos y la incertidumbre de largo plazo asociada a los impactos esperados (Marcos-García y Puli-

do-Velázquez, 2017; Khan *et ál.*, 2016; Esteve *et ál.*, 2015; Del Vasto-Terrientes *et ál.*, 2016).

6.4.3. Actividades de adaptación autónoma

En términos de la experiencia práctica se puede apreciar que, en general, las medidas de adaptación se están tomando de una manera reactiva a la ocurrencia de eventos extremos (sequías u otros eventos extremos). Esto sucede especialmente en las escalas de implementación más pequeñas, en las que se va reduciendo la capacidad (financiera, técnica) de poder considerar escenarios de largo plazo en un formato de planificación. En este sentido, existen muchos ejemplos de aplicaciones a una escala individual, como es el caso de agricultores, ganaderos (p. ej., energía solar para suministro de agua de camélidos; ver **caso de estudio 6.7.4**), o dueños de hogar (Roco *et ál.*, 2016, Eakin *et ál.*, 2016), o a escalas urbanas agregadas, como es el caso de algunas megametrópolis que están siendo afectadas por eventos climáticos, como São Paulo (Di Giulio *et ál.*, 2018 y **caso de estudio 6.7.6**), Santiago (Vicuña *et ál.*, 2018 y **caso de estudio 6.7.7**) (ver ejemplos en **Tabla 6.3**). Un caso interesante son las aplicaciones a escala comunitaria que se están haciendo especialmente en América Central y América del Sur (p. ej., Minucci, 2016; De Lira Azevêdo, 2017). Una de las medidas que ha cobrado mucha relevancia en estas experiencias comunitarias tiene relación con los sistemas de cosecha de agua de lluvia (sistemas de captación y almacenamiento de aguas de lluvia). El caso de la comunidad Chortitzer en el Chaco paraguayo presentado en el **caso de estudio 6.7.5** es uno de muchos ejemplos de experiencias que se están desarrollando en la región, que además en muchos casos cuentan con interesantes conexiones con saber ancestral y modelos de gobernanza comunitarios (ver ejemplos en Verbist *et ál.*, 2018 y FAO, 2013).

6.5. Barreras, oportunidades e interacciones

En materia de gestión de recursos hídricos, para asegurar la correcta (eficiente, justa, sin conflictos o impactos ambientales) conexión entre las necesidades y la provisión de recursos hídricos, independiente de los impactos del cambio climático, se requiere una gobernanza adecuada con su conjunto de reglas e instituciones. Una gobernanza inadecuada pasa a ser una barrera en la implementación de medidas de adaptación en el contexto del cambio climático. De acuerdo con Magrin *et ál.* (2014), en América Central y América del Sur a un nivel institucional se han desarrollado en los últimos años una serie de reformas y políticas con el objetivo de reducir la vulnerabilidad a la variabilidad climática. Ejemplos son la política nacional de recursos hídricos introducida en 1997 en Brasil y políticas similares introducidas en otros países de la región (Engle *et ál.*, 2011; Hantke-Domas, 2011). En Europa, en particular en las regiones mediterráneas, también se han revisado las condiciones de base institucional en la gestión

de los recursos hídricos, especialmente para hacer frente a eventos de sequía (Kahil *et ál.*, 2016; Garrote *et ál.*, 2016). La literatura reconoce las mejoras institucionales y de gobernanza que se requieren para lograr una adecuada implementación de las medidas de adaptación en la gestión de recursos hídricos (por ejemplo, Halsnæs y Verhagen, 2007; Engle y Lemos, 2010; Kuzdas *et ál.*, 2016; Hurlbert y Gupta, 2017; Loris *et ál.*, 2014). El uso de herramientas para la toma de decisiones permite evaluar los beneficios y costos asociados a la implementación de medidas de adaptación.

Algunas de estas barreras institucionales son menos evidentes a escalas más pequeñas, donde las decisiones son más fáciles de tomar, como en el caso de agricultores o dueños de hogar, como se presentó con anterioridad. Sin embargo, pese a esta facilidad de implementación a escalas muy pequeñas, es complejo contar con la información precisa que permita caracterizar las necesidades futuras de adaptación. Por otra parte, cuando las escalas espaciales aumentan, los desafíos de coordinación intersectorial y reconociendo intereses múltiples generan mayores retos en el momento de implementar medidas de adaptación. Esto puede ocurrir, por ejemplo, a escala de ciudades (Di Giulio *et ál.*, 2018), a escala de cuencas (Kumar *et ál.*, 2016; Del Vasto-Terrientes *et ál.*, 2016; Escriba-Bou *et ál.*, 2017) (ver **caso de estudio 6.7.1**) o a una escala de países o grupos de países (Hurlbert y Gupta 2017; Garrote *et ál.*, 2016) (ver **caso de estudio 6.7.2**). El problema de las interrelaciones a distintas escalas queda ejemplificado en los efectos que la implementación de una medida de adaptación, como podría ser la mejora en la eficiencia de riego, en una parte de la cuenca puede afectar al uso del agua en otras partes, si es que no se tiene en cuenta la gestión acoplada de uso del agua y uso del suelo (p. ej., Scott *et ál.*, 2014; Vicuña *et ál.*, 2014). Por otra parte, los ejemplos de soluciones a escala comunitaria, como es el caso de los sistemas de captación de aguas de lluvia (ver **caso de estudio 6.7.5**), muestran ejemplos donde la colaboración y el trabajo coordinado permiten la implementación de medidas de adaptación eficientes y efectivas. La planificación y colaboración a toda escala (comunidad, cuenca y país) es clave para definir estrategias exitosas.

Adicionalmente a las interacciones a distintas escalas, los sistemas de recursos hídricos tienen múltiples interacciones con otros sectores o sistemas que se ejemplifican en otros capítulos de este libro (p. ej., **Capítulo 3**, ecosistemas terrestres y acuáticos continentales; **Capítulo 7**, sector agropecuario; **Capítulo 10**, inundaciones y sequías; **Capítulo 13**, asentamientos urbanos y rurales; **Capítulo 15**, turismo; **Capítulo 16**, salud). Una conexión que se releva en este capítulo es la que existe entre el agua, la energía y los alimentos. Algunos ejemplos de estas relaciones son el **caso de estudio 6.7.2**, conectado con el consumo de electricidad para el bombeo de agua subterránea en México, o el **caso de estudio 6.7.4**, ligado al uso de paneles fotovoltaicos para la producción de agua para el ganado, o los múltiples ejemplos presentados respecto de los impactos del cambio climático sobre la producción de hidroelectricidad, especialmente relevante en América Central y América del Sur. Entender el nex

entre agua, energía y alimentos es clave para generar interacciones virtuosas y cobeneficios en el diseño de medidas de adaptación. Incluso incentivos mal orientados respecto del uso incorrecto de este nex pueden generar casos de maladaptación.

6.6. Medidas o indicadores de la efectividad de la adaptación

Todavía falta tiempo para lograr la implementación y evaluación de medidas en el contexto de la incertidumbre de impactos en el largo plazo. En algunos casos, sin embargo, se empieza a visualizar la necesidad de ir adelantándose a estos impactos, aumentando los niveles de seguridad esperados en las obras. Por ejemplo, el caso de la ciudad de Santiago (ver el **caso de estudio 6.7.7**) muestra cómo las primeras obras que otorgan resiliencia a la producción de agua potable se han desarrollado de manera reactiva, después de algún evento extremo sin precedentes en el pasado reciente. Sin embargo, el ente regulador basado en esta experiencia ha empezado a exigir en los planes de desarrollo de estas empresas niveles de seguridad mayores, que puedan responder a eventos que aún no necesariamente han ocurrido. En general, el diseño de infraestructura es un tema que debe empezar a reconocer de manera más anticipada los impactos de largo plazo durante el periodo de operación de estas obras (MOP, 2017).

En un contexto en el que el clima (al igual que muchos otros factores que afectan a los recursos hídricos) cambia constantemente se requiere algún mecanismo para poder medir los avances o retrocesos en materia de adaptación (Varady *et ál.*, 2016). Tomando en cuenta el marco conceptual del capítulo, se destacan cuáles deben ser las métricas que ayuden a verificar el estado de avance respecto de la implementación de medidas de adaptación. En este sentido, los conceptos de seguridad hídrica, servicios ecosistémicos y bienestar humano aparecen como objetivos de primer orden (Ocampo-Melgar *et ál.*, 2016). En este contexto, los componentes de la seguridad hídrica y sus interrelaciones proveen los indicadores que idealmente se deben considerar. La bibliografía respecto de indicadores de seguridad hídrica es amplia y por ende existen múltiples ejemplos al respecto. Sin embargo, es importante reconocer que surgen dificultades en el momento de consensuar o implementar indicadores asociados a la seguridad hídrica (p. ej., Gunda *et ál.*, 2015).

6.7. Casos de estudio

En esta sección del capítulo se presentan los siete casos de estudio que reflejan la adaptación a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. Gran parte de los casos presentados tienen relación con la provisión de los recursos hídricos en términos del acceso a fuentes, o bien en términos

de la operación y diseño de infraestructuras que permitan lograr dicho acceso. Cabe destacar que existen alternativas para adaptarse en términos de reducción de consumo de agua, las cuales han sido abordadas en otros capítulos de este mismo informe (p. ej., el tema de consumo de agua para riego se trata en el **Capítulo 7** sobre recursos agropecuarios).

Los casos de estudio se han escogido para representar estrategias aplicadas a distintas escalas territoriales (nacional, cuenca, municipal) y en distintos contextos geográficos (ver **Figura 6.4** con ubicación de los casos de estudio) e institucionales.

6.7.1. Combinación de sistemas de apoyo a la decisión y talleres participativos para el diseño de medidas de adaptación en la demarcación hidrográfica del Júcar (España)

6.7.1.1. Resumen

Estudios previos han puesto de manifiesto los impactos del cambio climático en la demarcación hidrográfica del Júcar,

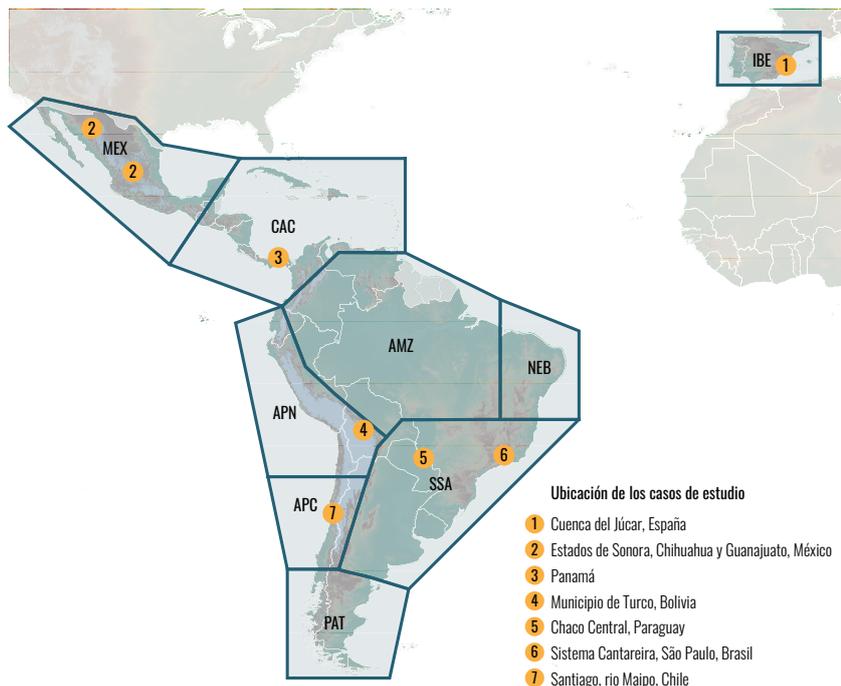


Figura 6.4. Mapa con la ubicación de los casos de estudio presentados en este capítulo. Leyenda de las regiones: México (MEX); América Central y Caribe (CAC); Amazonia (AMZ); NE de Brasil (NEB); sudeste de América (SSA); Andino-Pacífico Norte (APN); Andino-Pacífico Central (APC); Patagonia (PAT), y Península Ibérica (IBE). **Fuente:** elaboración propia.

mostrando una reducción significativa de las aportaciones de los ríos y una intensificación de los episodios extremos de sequía. Si a eso se unen los posibles cambios socioeconómicos y con ellos los cambios en la demanda de agua que se puedan dar en la cuenca, los retos a afrontar son significativos en cuanto a la gestión de los recursos hídricos. El uso de sistemas de apoyo a la decisión (DSS por sus siglas en inglés) ha permitido analizar de manera estructurada las consecuencias de varios escenarios globales de cambio climático y socioeconómico sobre el futuro en un contexto local, debatiendo e identificando medidas de adaptación con los principales usuarios. Mediante la combinación de DSS capaces de simular impactos y vulnerabilidades de los sistemas (incluyendo indicadores de costo y beneficio, así como modelos hidroeconómicos) con talleres participativos con los usuarios, se han podido evaluar y priorizar un conjunto de medidas de adaptación localmente relevantes. Estas medidas permitirían reducir notablemente el impacto del cambio previsto en los escenarios que se consideran más plausibles en la cuenca del Júcar.

6.7.1.2. Introducción a la problemática del caso

La demarcación hidrográfica del Júcar está situada al este de España y está configurada por cuencas de diferentes ríos que desembocan en el mar Mediterráneo a lo largo de 574 km de costa. Tiene una extensión de 42.958 km² y una altitud máxima de 2.028 m s.n.m. La cuenca del río Júcar ocupa aproximadamente la mitad de la demarcación, siguiéndole en extensión la del río Turia. La temperatura media anual es de 15 °C, con mínimas de medias mensuales en invierno de 6 °C y máximas en verano de 26 °C. La precipitación total anual para 1940/41-2005/06 es de 513 mm (± 50 %), con veranos muy secos, de manera que muchos de sus cauces no presentan un régimen hidrológico permanente. Son frecuentes las tormentas intensas de tipo convectivo, que provocan inundaciones en ocasiones devastadoras. La evapotranspiración potencial es 907 mm/año, la evapotranspiración real, 432 mm/año y la escorrentía, 81 mm/año. Las aportaciones hídricas evaluadas en régimen natural son 3.460 hm³/año (80 % subterráneas). La demarcación cuenta con 5,2 millones de habitantes, aumentando considerablemente en época vacacional y siendo Valencia la principal ciudad, próxima a 1 millón de habitantes y con un alto desarrollo, donde la agricultura y el turismo son motores económicos específicos. El abastecimiento supone el 16 % de las demandas de agua, mientras que el regadío de 3.900 km² de tierras fértiles demanda el 80 %.

Históricamente se han implementado actuaciones de mejora del aprovechamiento del agua y actualmente la demarcación está muy regulada, con 27 presas con capacidad de 3.300 hm³ y una densa red de azudes y canales. El aprovechamiento es muy intenso, con ríos muy alterados y problemas de sobreexplotación de acuíferos, intrusión marina y contaminación. Se recurre a la reutilización del agua (120 hm³/año), a la desalación (10 hm³/ año) y al establecimiento de caudales ecológicos. Actualmente, no se cubren totalmente todas las demandas, con un déficit de 265 hm³/año. Los problemas se agravan en periodos de sequía. La Administración española afronta estos retos mediante medidas de análisis, vigilancia y actuación contempladas en los planes hidrológicos y en los planes especiales de sequía de cada demarcación.

La Oficina Española de Cambio Climático y la Dirección General del Agua han promovido la realización de estudios de detalle para evaluar el impacto hidrológico del cambio climático tanto en los recursos hídricos y eventos extremos como en las demandas hídricas, ecosistemas y sistemas de planificación (MIMAM, 2000; CEDEX, 2012, 2017). Los resultados del análisis de impactos se han incorporado en los planes hidrológicos de cuenca para estimar el balance hídrico en el horizonte temporal lejano, siguiendo lo especificado en la instrucción de planificación hidrológica (MARM, 2008). Estos trabajos a cargo de CEDEX han ido actualizándose, y en el último (CEDEX, 2017) se utilizaron modelos y escenarios de emisiones que fueron usados en el IPCC-AR5. Los resultados se prevén utilizar en la actualización de los planes hidrológicos 2021-2027. Una característica común a las cuencas mediterráneas es la alta incertidumbre de los resultados del análisis de impactos, mostrada en el sesgo de la precipitación simulada, en la disparidad de resultados entre las distintas proyecciones y en las discontinuidades espaciales y temporales de los cambios. Dicha incertidumbre está relacionada con las características de la precipitación, muy irregular y con frecuentes episodios convectivos que son difíciles de representar por los modelos climáticos.

6.7.1.3. Descripción del caso

El plan hidrológico vigente de la demarcación del Júcar (2015-2021) considera la adaptación al cambio climático de dos maneras. Primero, haciendo los balances hídricos para los escenarios actual, corto y medio plazo con los recursos hídricos de las series hidrológicas desde 1980. La precipitación media para el periodo 1980-2011 ha disminuido un 2,8 % con relación a 1940-2011, lo que conlleva una bajada de las aportaciones de un 6,8 %. De ese modo, se está planificando la asignación de recursos y las inversiones, considerando esa disminución de recursos hídricos, bien sea debida al cambio climático, a un cambio en los usos del suelo o a otros factores.

La segunda manera es analizando el escenario a largo plazo (2033). Las demandas se actualizan y los recursos hídricos se estiman aplicando una reducción del 12 % a la serie del periodo 1940-2011; este porcentaje es la media de 6 pro-

yecciones para el escenario de emisiones más desfavorable estudiado (en CEDEX 2012 se estudiaron los escenarios SRES A2 y B2). Es significativo que el sistema Júcar, que aporta más del 50 % de los recursos totales, presente una reducción de la aportación del 11,7 % (superior en un 40 % al porcentaje de reducción medio para el total de la demarcación). Así, el sistema Júcar ya ha experimentado en las últimas décadas una reducción similar a la aplicada en el Plan Hidrológico (12 %) para considerar el efecto del cambio climático (Marcos-García y Pulido-Velázquez, 2017a). En CEDEX (2017) se actualiza la evaluación para poder ser utilizada en los próximos planes, cifrándose la reducción de aportación para el horizonte lejano del año 2039 en 12 %, según el RCP 4.5, y en 21 %, según el RCP 8.5. Casi todos los sistemas tendrían problemas para satisfacer las demandas. Ese aumento del déficit se atenuaría fomentando el ahorro, diversificando las fuentes de suministro, flexibilizando y adaptando la gestión integrada del sistema e incrementando ocasionalmente la extracción de agua subterránea con un seguimiento exhaustivo de los niveles piezométricos. No obstante, existe mucha incertidumbre en torno al efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos, así como sobre las demandas y los ecosistemas. Así, no se consideran actuaciones adicionales a las ya tenidas en cuenta en el escenario anterior.

El plan contempla la financiación de estudios que posibiliten avanzar en el conocimiento y donde además se analicen las soluciones que permitan adaptar el programa de medidas del plan a las necesidades que se deriven del estudio. Asimismo, se comprueba la adecuación del programa de medidas del plan a los escenarios de cambio climático considerados, incluyendo la capacidad de adaptación de las medidas al cambio climático, así como su robustez y eficacia para alcanzar los objetivos de la planificación hidrológica.

Es previsible que el cambio climático agudice los efectos de las sequías, tanto porque habrá menos agua disponible como porque cambiará el régimen de ocurrencia, siendo más acusado en las áreas de topografía media-alta donde se generan y se pueden regular la mayoría de los recursos hídricos (CEDEX, 2017; Marcos-García *et al.*, 2017). El Plan Especial de Sequía del Júcar, elaborado por la Confederación Hidrográfica, se basa en un sistema global de indicadores hidrológicos que sirven para la declaración formal de sequía y en unas reglas de explotación de los sistemas con las medidas a aplicar (gobernanza, ahorro, revisión de redes, mayor eficiencia de riego, pozos de sequía e intensificar extracciones, reutilización y desalación, etc.).

La planificación hidrológica se desarrolla con el apoyo de herramientas que constituyen los sistemas de apoyo a la decisión (DSS) para planificación y gestión de cuencas. El paquete de programas AQUATOOL para el desarrollo de DDS, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, se ha utilizado para evaluar el efecto del cambio climático y la eficacia de las medidas de adaptación.

Usando AQUATOOL como punto de partida, Escrivá-Bou *et al.* (2017) presentan el desarrollo y la aplicación de un modelo

hidroeconómico para evaluar el impacto del cambio climático y el posible efecto de diferentes estrategias de gestión de la cuenca del Júcar. Se espera un significativo impacto del aumento de las sequías y los déficits de suministro a las demandas, evaluado en 1 millón de euros en el caso base (aportaciones actuales), y hasta 8, 21 y 91 millones de euros en los escenarios de corto plazo, mediano y largo plazo, respectivamente, asumiendo que no haya cambios en la infraestructura u operación del sistema (escenario *business-as-usual*). Sin embargo, el sistema podría ahorrar entre 3 y 65 millones de euros por año de las pérdidas económicas esperadas mediante la aplicación de diferentes estrategias de adaptación.

El primer paso para el diseño de estrategias de adaptación es la evaluación de las implicaciones para la planificación derivadas de los impactos identificados (Marcos-García y Pulido-Velázquez, 2017b). A continuación, es necesario identificar posibles medidas a implementar en el sistema para abordar los riesgos del cambio climático, incluyendo no solo medidas estructurales, sino también instrumentos de comunicación y concienciación, formación y asistencia técnica, coordinación y planificación; legislación y regulación, e instrumentos económicos (p. ej., políticas de precios, mercados del agua, etc.).

En el caso de estudio del Júcar, el diseño de medidas de adaptación se ha desarrollado a través modelos hidroeconómicos que son capaces de representar aspectos hidrológicos, ingenieriles, ambientales y económicos de los sistemas de recursos hídricos. Adicionalmente, se han desarrollado herramientas participativas con actores clave del sector agrícola para estudiar cómo perciben los agricultores los impactos del cambio climático, qué cambios y qué medidas de adaptación identifican, y cómo las valoran, usando supuestos climáticos y socioeconómicos diferentes (Sanchis-Ibor *et ál.*, 2018). Posteriormente se contrastaron y validaron estas medidas en un taller con gestores, expertos y representantes de los diferentes grupos de interés de la cuenca. Las medidas han sido después evaluadas mediante un modelo hidroeconómico desarrollado para la cuenca del Júcar. Esto permite comparar costos y beneficios esperados de las distintas estrategias de adaptación previamente identificadas en un enfoque de abajo arriba para los escenarios desarrollados mediante el enfoque de arriba abajo y así poder priorizar medidas de adaptación. Otro asunto es el diseño de un reparto equitativo de los costos que conlleva el proceso de adaptación, tema que fue abordado en un estudio previo para la cuenca del río Orb en Francia (Girard *et ál.*, 2016).

6.7.1.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

Uno de los grandes retos en la implementación de estrategias de adaptación es cómo hacer frente a la incertidumbre en los resultados de los análisis de impactos. En relación con

los esfuerzos para reducir la incertidumbre en las proyecciones climáticas, hoy en día se plantea un nuevo paradigma que asume la incertidumbre como inevitable y se orienta a conseguir sistemas más robustos y flexibles. Esta es la filosofía detrás del estudio que se lleva a cabo en la cuenca del Júcar.

El sistema Júcar es un sistema complejo que ha planteado notables retos de gestión durante décadas que se han ido afrontando con soluciones imaginativas e innovadoras. Sin embargo, la rigidez del sistema de derechos del agua y la inercia a los cambios plantean dificultades a la hora de flexibilizar la gestión del recurso para hacer frente a los retos futuros. La puesta en marcha de algunas de las medidas analizadas (p. ej., políticas de precios del agua) requerirá de una dosis importante de voluntad y consenso entre las partes.

Aunque el cambio climático es una preocupación mundial, los problemas de agua son locales (Escrivá-Bou *et ál.*, 2017). Se necesita un análisis a fondo del contexto local para tener en cuenta las respuestas de adaptación. En el caso de la cuenca del Júcar, el estudio interdisciplinar se ha visto favorecido por el hecho de ser una zona piloto en España en muchos casos (p. ej., trabajos de implementación de la Directiva Marco del Agua europea en España), lo que ha permitido disponer de un gran número de datos y estudios, así como de modelos de gestión previos con una trayectoria consolidada en aplicaciones prácticas, y con una credibilidad ganada a lo largo del tiempo entre las partes interesadas de la cuenca (Paredes-Arquiola *et ál.*, 2010).

La utilización de los DSS supone un apoyo técnico valioso de cara a transmitir el conocimiento del impacto del cambio climático, las posibles medidas a aplicar y sus repercusiones económicas. De ese modo, se está consiguiendo una mayor implicación y participación de los actores, disminuyendo su reticencia a la adopción de medidas tendentes al ahorro y mejor distribución del agua existente.

Por otra parte, los talleres con los usuarios han permitido integrar la visión de los principales actores (gestores, técnicos, usuarios) en el diseño de una estrategia de adaptación al cambio climático y global en la cuenca del Júcar. La participación local resultó clave para elaborar una visión más holística de la evolución del sector agrícola (mayor usuario del agua en la cuenca, con casi el 80 % de la demanda) y sus implicaciones para la gestión del agua. Así, la discusión aportó aspectos novedosos, como la incidencia que podría tener el desarrollo de energías renovables en la sobreexplotación de acuíferos (al reducir los costos de extracción), o el observado incremento del abandono de explotaciones en las zonas litorales, que podría resultar en un mayor acaparamiento de tierras y de agua (Sanchis-Ibor *et ál.*, 2018).

Los estudios de adaptación permiten identificar vulnerabilidades y también oportunidades para afrontar los riesgos y demandas futuras. Con ese fin, es vital analizar con detalle esos riesgos tanto en la situación actual como en el futuro. Además, es vital la difusión del conocimiento del riesgo, no solo a los técnicos y responsables, sino a todos los acto-

res, usuarios y población en general, utilizando los medios de comunicación social y haciendo especial hincapié en las reuniones con los implicados. Los DSS y la integración de los enfoques de arriba abajo y de abajo arriba se han revelado útiles para el diseño de estrategias de adaptación, permitiendo identificar, priorizar y evaluar las opciones de adaptación relevantes a nivel local, teniendo en cuenta los criterios prioritarios para los grupos de interés de la cuenca.

6.7.2. Electricidad para el uso de agua subterránea en México: oportunidades y limitaciones para la respuesta de adaptación al cambio climático

6.7.2.1. Resumen

El uso de aguas subterráneas en el riego contribuye significativamente a la productividad agrícola en México. Sin embargo, hay dos factores preocupantes: la matriz de generación eléctrica actual que depende en gran medida de los hidrocarburos y el suministro de electricidad subsidiado para el bombeo de aguas subterráneas se combinan, sin políticas adecuadas, para dar como resultado el agotamiento de los acuíferos y altas emisiones de gases de efecto invernadero. Este caso de estudio presenta el análisis y los hallazgos del nexo entre el agua (en este caso agua subterránea), la energía y los alimentos en Chihuahua, Sonora y Guanajuato, los tres estados mexicanos con el mayor consumo de electricidad para el bombeo de agua subterránea. En todo México, el suministro de electricidad nocturno a tarifas subsidiadas se introdujo en 2004, y la proporción del bombeo nocturno de agua de riego en comparación con el bombeo diurno continúa aumentando hasta el presente. El nexo agua, energía y alimentos puede utilizarse para identificar un conjunto de patrones de uso de recursos, implicaciones de políticas y opciones de respuesta adaptativa, como por ejemplo, el riego nocturno, que disminuye la evaporación y aumenta la transpiración. Los agricultores requieren otros estímulos para no solamente bombear de noche, sino también aplicar el riego a los cultivos durante la noche con el fin de realizar un ahorro verdadero de agua. El nexo también puede representar una de las herramientas para responder de manera adaptativa al cambio climático, principalmente a través de acciones sinérgicas de adaptación y mitigación. La coordinación de políticas públicas para el agua, así como para la energía, presenta oportunidades reales en este sentido.

6.7.2.2. Introducción a la problemática del caso

Este caso de estudio examina las conexiones entre electricidad, agua y la producción de alimentos en el contexto de

cambio climático con referencia específica a la gestión de aguas subterráneas en México. El caso de México se presenta como un ejemplo instructivo y apremiante, dada su dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía, su mayor dependencia en aguas subterráneas para riego y otras demandas de agua, y su ubicación geográfica y vulnerabilidad a los impactos del cambio climático.

El centro y norte de México son especialmente sensibles a las interacciones de clima, agua, energía y alimentos, dado que esta región está experimentando escasez de agua impulsada por el cambio climático, la variabilidad hidrológica y las demandas humanas de agua. Estudios recientes basados en el 4.º Informe del IPCC (p. ej., Scott, 2011) más el registro observacional (Matías y Magaña, 2010; Brito-Castillo, 2012) indican que bajo las proyecciones CMIP5 las regiones áridas y semiáridas del centro y norte de México enfrentarán un incremento de temperatura y una variabilidad de la precipitación que contribuirán a una creciente escasez del agua. El riego con aguas subterráneas ha sido uno de los pilares para la agricultura y la producción ganadera de esta región, al menos durante las últimas tres décadas. Los datos oficiales muestran que el uso actual del agua subterránea para fines del sector primario (agricultura y ganadería) es de 23,8 km³/año a nivel nacional (de un total de 33,8 km³ del agua subterránea utilizada para todos los fines) en comparación con 49,1 km³ de agua superficial a nivel nacional considerada para todos los fines, excluyendo la generación hidroeléctrica, considerada como uso no consuntivo (CONAGUA, 2017). La generación eléctrica de México está dominada por combustibles fósiles (CFE, 2013; Sheinbaum-Pardo *et ál.*, 2012; Santoyo-Castelazo *et ál.*, 2011).

6.7.2.3. Descripción del caso

Con base en los datos presentados en la **Tabla 6.4**, el bombeo de agua subterránea en México en 2009 dio como resultado emisiones estimadas de 4,7 millones de toneladas métricas de CO₂, equivalentes al 3,6 % del total de emisiones de combustibles fósiles a nivel nacional de 129,8 millones de toneladas

Tabla 6.4. Emisión de CO₂ asociado a generación eléctrica en México. *Fuentes:* (a) IEA (2019); (b) EIA (2019).

Combustible	Factor de emisión (TCO ₂ /MWh ^a)	Porcentaje generación en México ^b (%)
Carbón	0,95	10,8
Gas natural	0,51	60,0
Petróleo	0,73	10,6
Hidroeléctrico, geotérmico, eólico, solar	0	15,3
Nuclear	0	3,3
Matriz de generación completa	0,49	100

métricas en 2008 (Boden *et ál.*, 2011). En ubicaciones con bombas dinámicas profundas, se emitió hasta 0,22 kg de CO₂/m³ de agua subterránea bombeada. Es importante destacar que una revisión de las condiciones recientes (hasta el año 2016) de generación de electricidad en México (IEA, 2019; Banco Mundial, 2019) da cuenta de que la situación no ha cambiado de manera importante en los últimos años, de acuerdo con la información públicamente disponible.

Los estados mexicanos que bombean los volúmenes más altos de agua subterránea para riego son los que históricamente han sido los más productivos en agricultura: Chihuahua y Sonora en el noroeste y Guanajuato en el centro del país. Los nuevos pozos se declaran prohibidos en acuíferos catalogados como sobreexplotados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); esto se aplica a 100 acuíferos a nivel nacional (de 653 del total evaluados), 11 en Chihuahua (61 en total), 11 en Guanajuato (18 en total) y 12 en Sonora (60 en total).

Las tarifas de energía eléctrica varían según el tipo de conexión, hora del día y región. Una tarifa subsidiada (conocida como tarifa 09) está disponible «para bombear agua para agricultura de riego» (CFE, 2013). En 2003 se introdujo la «tarifa de estímulo nocturna para bombeo de agua para riego

agrícola» (09-N, aplicable para el bombeo entre la medianoche y las 8.00 h), que entró en vigor en 2004. Las tarifas 09 y 09-N proporcionan excelentes representaciones para el uso de agua subterránea agrícola (Muñoz *et ál.*, 2006). La electricidad para el bombeo de agua subterránea es subsidiada por un factor de dos a cuatro veces en comparación con las tarifas comerciales, mientras que el bombeo nocturno es subsidiado a un 20 % por debajo de las tarifas diurnas.

El efecto «estímulo» de la tarifa eléctrica 09-N para promover el cambio del bombeo diurno a bombeo nocturno ocurrió en todo el país (Figura 6.5a) y es evidente para los tres estados de interés (Figuras 6.5b, c, d), los cuales también muestran las tendencias del porcentaje de electricidad utilizada para el bombeo de aguas subterráneas agrícolas (ASA) respecto de la oferta total. El riego nocturno a menudo implica costos adicionales para construir represas para almacenar el agua bombeada hasta que la mano de obra agrícola esté disponible para las operaciones durante el día. Esto puede requerir un bombeo subsiguiente para presurizar el equipo de riego incluyendo sistemas de goteo y rociadores. En algunos casos, las bombas de energía solar se utilizan para aplicaciones de baja presión, como el riego por goteo, pero la energía de la red sigue siendo esencial para el bombeo profundo.

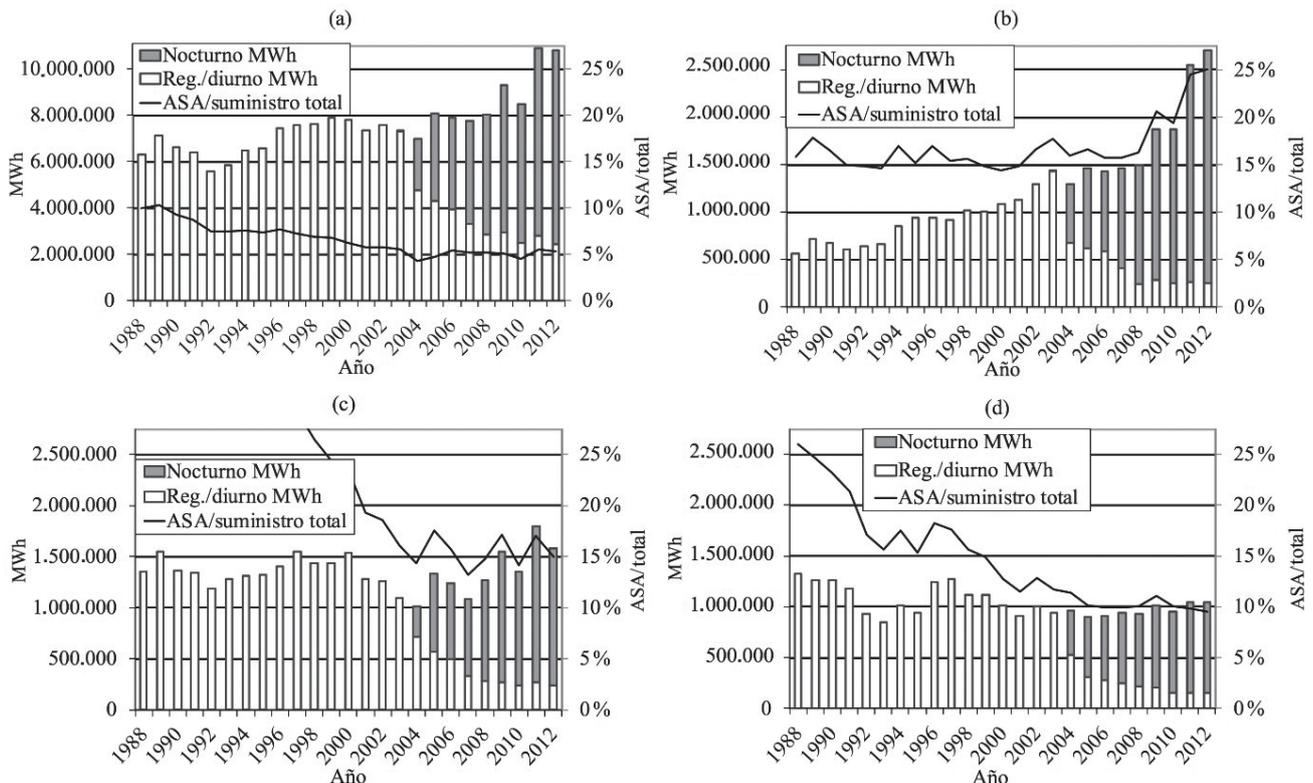


Figura 6.5. Electricidad utilizada para bombear agua subterránea agrícola para (a) México a nivel nacional, y los estados de (b) Chihuahua, (c) Guanajuato y (d) Sonora, 1988-2012, mostrando el cambio a bombeo nocturno y la fracción de electricidad para el bombeo de agua subterránea agrícola en la oferta total de electricidad a nivel estatal. Fuente: Scott, 2013.

El cambio a la oferta nocturna en el 2004 dio lugar a aumentos en las extracciones de aguas subterráneas a nivel nacional, incluso cuando se toman en cuenta los efectos de la caída de los niveles de agua que requieren más electricidad para bombear un volumen dado de agua (Scott, 2011). El aumento continuo del bombeo es más pronunciado en el estado de Chihuahua, donde el riego actualmente consume más de un cuarto de toda la electricidad de este estado y bombea casi 6 km³ de agua subterránea al año con un aumento del 44 % en solo tres años a partir de 2010-2012. En este caso, la electricidad para bombeo de aguas subterráneas agrícolas aumentó 9,6 % por año durante los siguientes ocho años con respecto al 2004, comparado con un 4,0 % por año durante los ocho años anteriores (incluso mientras la energía total suministrada en el estado para todos los propósitos disminuyó su tasa de crecimiento después de 2004). Fue la manera de abordar desde una perspectiva política más seria, pero a la vez más sencilla, en la que Chihuahua continuó agregando nuevos usuarios de aguas subterráneas agrícolas (nuevas conexiones eléctricas) a una tasa compuesta del 3,3 % por año después de 2004; Sonora y Guanajuato, después de 2004 agregaron nuevos usuarios de agua subterránea agrícola al 2,0 % y 0,9 %/año, respectivamente. Además, para mitigar las condiciones de sequía en Chihuahua (INE, 2013), las cuales fueron catalogadas como «catastróficas» por el gobernador (Milenio, 2012), los gobiernos federales y estatales respondieron a los esfuerzos de cabildeo por parte de los grandes agricultores y cancelaron una porción de las facturas de electricidad no pagadas de los agricultores estimadas en un total de más de 200 millones de dólares solo en este estado (Jornada, 2012). Estas tendencias tienen implicaciones importantes para la sostenibilidad del uso de los recursos (ver **Figura 6.6**) y, como se verá más adelante, ofrecen oportunidades de adaptación al cambio climático.

6.7.2.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

El nexo agua, energía y alimentos es una gran oportunidad para la gestión y política de estos recursos. Si bien ejemplos de casos presentados en este trabajo, como el de México, ofrecen información específica sobre las interconexiones entre electricidad, agua y clima, estos también pueden utilizarse para identificar un conjunto más amplio de patrones de uso de recursos, implicaciones de políticas y opciones de respuesta adaptativa. Un ejemplo claro es el riego nocturno, práctica que tiende a disminuir la evaporación y aumentar la transpiración. Si bien la transición de riego diurno a nocturno en 2004 fue resultado de políticas tarifarias, los agricultores requieren otros estímulos para no solamente bombear de noche, sino también aplicar el riego a los cultivos durante la noche para realizar un ahorro verdadero de agua. En cambio, si el riego nocturno u otras prácticas de aumentar la eficiencia solo facilitan un aumento de superficie regada, no se ahorra el agua (Lankford et al., en revisión).

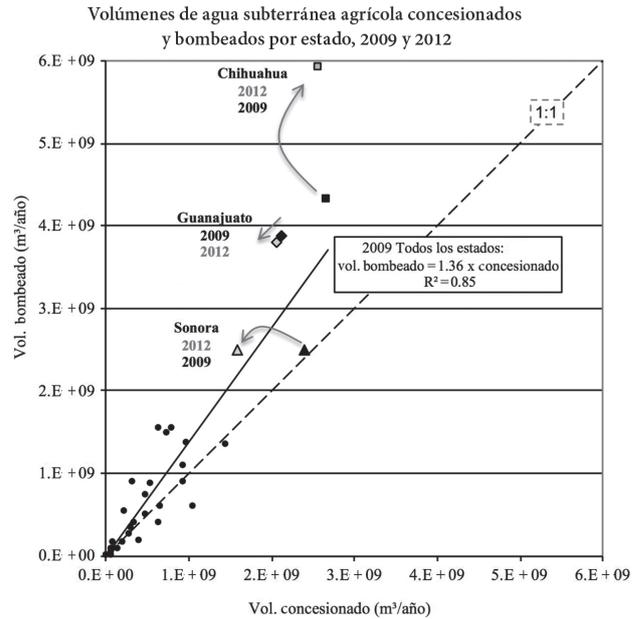


Figura 6.6. Relación de los volúmenes de agua subterránea agrícola bombeados (derivados del consumo de electricidad medida) y volúmenes reportados por cada estado en México en 2009, mostrando los cambios en 2009-2012 para los estados de Chihuahua, Guanajuato y Sonora. La relación mayor a 1:1 entre el volumen bombeado y el volumen concesionado indica que el seguimiento de las concesiones es ineficaz en los estados de mayor explotación de aguas subterráneas. Nota: 1,0 E + 09 m³ = 1 km³. Volumen bombeado (m³) = energía (kWh) × eficiencia/ascenso (m)/0,0026 (conversión constante). Fuente: Scott, 2013.

El potencial de aprovechamiento del nexo entre aguas subterráneas y energía para la gestión sostenible del acuífero depende de que los responsables de la formulación de políticas y los usuarios de las aguas subterráneas identifiquen intervenciones eficaces en la oferta y el precio de la electricidad (Scott y Shah, 2004; Shah, 2009), así como otros mecanismos de soporte que sean políticamente viables y aceptables para todos los agricultores a fin de compensar los impactos perjudiciales para los usuarios, incluyéndolos mediante transferencias de efectivo e incentivos para cambiar los patrones de cultivo, reducir el área irrigada y adoptar tecnologías que ahorren agua (Muñoz et al., 2006).

El nexo también puede representar una de las herramientas para responder de manera adaptativa al cambio ambiental global, principalmente a través de acciones de adaptación y mitigación del clima. La coordinación de políticas públicas para el agua (por ejemplo, otorgar volúmenes titulados de agua menores al suministro renovable, manteniendo una reserva estratégica de agua para contingencias futuras que inevitablemente se derivarán del cambio climático e invirtiendo en la gestión de la recarga de acuífero), así como para la energía (por ejemplo, la eliminación escalonada de las

subvenciones arancelarias analizadas en detalle por Scott 2011, con gestión de la demanda y los límites del consumo de energía para limitar las emisiones), presenta oportunidades reales.

El uso sostenible de las aguas subterráneas puede representar una respuesta adaptativa al cambio climático si el agua y los recursos energéticos se gestionan conjuntamente, incluida la eliminación juiciosa de los subsidios a la electricidad utilizada para bombear agua subterránea. Esto fortalecería tres objetivos centrales de política: (1) mantener o mejorar el bienestar humano salvaguardando las aguas subterráneas para el abastecimiento de agua potable y apoyo a los medios de subsistencia; (2) proteger la integridad de los servicios de los ecosistemas al asegurar el flujo de los hábitats ribereños y el valor de las amenidades humanas, y (3) reducir las emisiones.

6.7.3. Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá

6.7.3.1. Resumen

El primer Plan Nacional de Seguridad Hídrica de la República de Panamá fue un ejercicio multidisciplinario de planificación de corto, mediano y largo plazo como respuesta a la variabilidad y cambio global, incluyendo el fenómeno El Niño y su impacto en el recurso agua en poblaciones que ya presentan problemas en su balance de agua disponible para los diversos usos. Este plan es una hoja de ruta solidaria que, ante su efectiva implementación, asegurará la disponibilidad de este abundante recurso, respaldando así el crecimiento socioeconómico inclusivo y asegurando la integridad ambiental de las 52 cuencas hidrográficas. El plan además facilita el proceso de descentralización de funciones estatales y ayuda a reducir la migración interna y a mejorar la calidad de vida y las oportunidades de la población rural. Como parte de los impactos directos del plan, se destaca la creación de la instancia de gobernanza hídrica denominada Consejo Nacional del Agua como un impulso hacia una nueva cultura del agua en Panamá. De esta manera, Panamá es pionero en Centroamérica en adoptar el concepto de seguridad hídrica ante el cambio climático como política de Estado y con miras a acelerar el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con metas para 2030.

6.7.3.2. Introducción a la problemática del caso

Panamá experimenta cambios estacionales y espacialmente diferenciados de manera hidroclimática (ver **Figura 6.7**). Por su hidrografía, la disponibilidad de agua dulce per cápita estimada (definida como la diferencia entre la precipitación promedio anual y la evapotranspiración real) es de 29.000 m³, según MiAMBIENTE (2017), de lo que solo se utiliza el 25,8 %. A

pesar del superávit, aún persisten retos de seguridad hídrica en los habitantes: el 7,5 % aún no tienen cobertura de agua potable, el 10 % no cuenta con servicio de saneamiento, y el 30 % no dispone del líquido las 24 horas. La zona más seca, llamada Arco Seco, ya refleja una alteración en el balance de disponibilidad de agua, particularmente en época seca, durante la cual la sequía suele intensificarse.

Para MiAMBIENTE (2017), tanto el incremento de los eventos climáticos extremos como el fenómeno de El Niño en 2015 se relacionan con una marcada disminución de lluvias y reducción en el abastecimiento del agua potable, contexto en el que la competencia hídrica aumenta diariamente. La mayor demanda de agua se concentra en la vertiente del Pacífico, donde habita el 83 % (2,96 millones de personas) de la población y se concentra más del 70 % las actividades económicas. ANAM (2013) indica que tal situación ha provocado un intensivo uso de las aguas subterráneas por medio de pozos, tal y como ocurre en el Arco Seco, donde existe un riesgo latente a futuro. De hecho, el IPCC indica que los escenarios de cambios en la precipitación hacia 2081-2100 estarán en +/- 10 %, es decir, cercanos a la variabilidad climática histórica y coincidiendo con las condiciones históricas de dicha zona, donde los eventos climáticos extremos (sequías e inundaciones) están presentes (Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Panamá, 2018).

6.7.3.3. Descripción del caso

El Plan Nacional de Seguridad Hídrica (PNSH) 2015-2050: Agua para Todos es un ejercicio de planificación a diversos horizontes y desarrollado en «un momento particularmente histórico» al conjuntarse factores de política sobre el crecimiento económico inclusivo, la entrada en operación del canal interoceánico ampliado, el proceso de descentralización de la gestión pública y los retos impresos del cambio climático global en relación con el agua.

El PNSH plantea cinco retos y metas asociados a su solución en términos de cobertura y suministro, disponibilidad del recurso, restauración de cuencas, infraestructura y nueva cultura de uso del recurso. Ante un diagnóstico elaborado conjuntamente con 19 instituciones con competencias en el tema, los resultados fueron presentados y validados en foros públicos de consulta abierta con representantes de todos los sectores que utilizan el agua. Con ello se han planteado cinco metas para el periodo 2015-2050:

- Meta n.º 1: acceso universal a agua de calidad y servicios de saneamiento.
- Meta n.º 2: agua para el crecimiento socioeconómico inclusivo.
- Meta n.º 3: gestión preventiva de los riesgos relacionados con el agua.
- Meta n.º 4: cuencas hidrográficas saludables.
- Meta n.º 5: sostenibilidad hídrica.

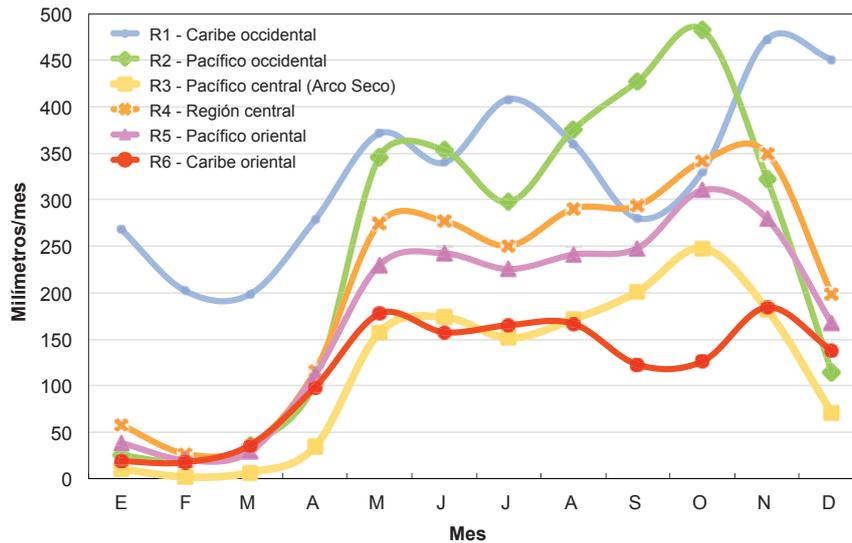
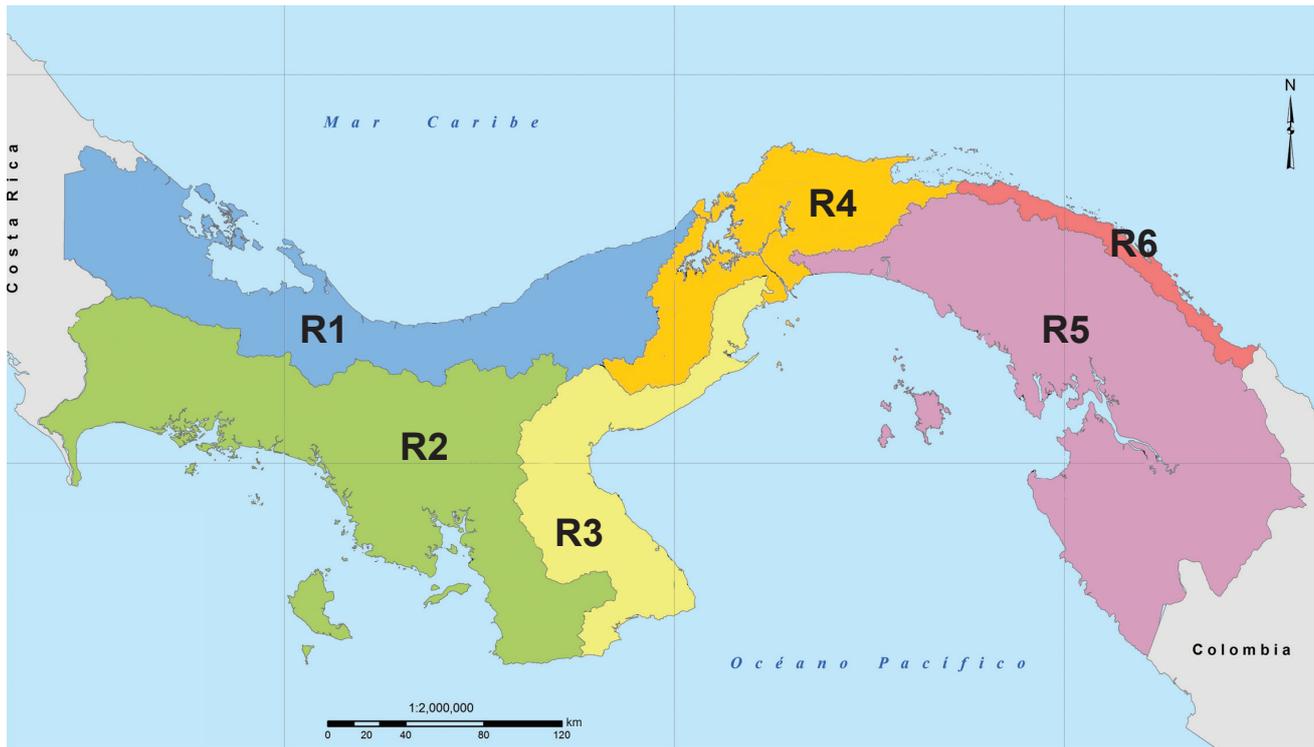


Figura 6.7. Regiones hidroclimáticas de Panamá (sup.) y datos mensuales de lluvia interanual promedio para cada una de ellas (inf.) en el periodo 1981-2014. Leyenda de colores de las regiones: R1, Caribe occidental (azul); R2, Pacífico occidental (verde); R3, Arco Seco (naranja); R4, Región central (amarillo); R5, Pacífico oriental (rosa); R6, Caribe oriental (rojo). Fuente: Aguilar et ál. (2016).

Cada meta cuenta con acciones concretas y respectivos proyectos y/o actividades con inversiones y prioridades indicativas a corto, mediano y largo plazo a fin de garantizar las fuentes hídricas y el suministro de agua necesario para la seguridad hídrica.

El PNSH se sustenta en el Plan Estratégico de Gobierno (PEG, 2014), que establece en su Eje 6: «Respeto, defensa y protección del medio ambiente», y hace énfasis en el desarrollo de políticas públicas en armonía con el medio ambiente; gestión de desastres, mitigación y adaptación al

cambio climático. Por ello, el respaldo institucional se impulsa desde el Ministerio del Ambiente, que, a su vez, establece la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) y ejecuta el Programa Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos 2010-2030 (PNGIRH). Tanto la política como el programa nacional incorporan acciones programáticas para asegurar la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo, así como la atención, protección y conservación de los ecosistemas, incluyendo la satisfacción de las demandas de agua de forma equitativa, considerando la disponibilidad en cantidad y calidad requerida del recurso como parte fundamental del desarrollo integral del país.

Así, la prioridad del PNSH está relacionada con: 1) la prioridad estratégica de gobierno; 2) la adaptación al cambio climático y reducción de la vulnerabilidad en los recursos hídricos, temas de interés nacional y cónsono con la PNCC; 3) la coherencia que guarda con las acciones programáticas de MIAMBIENTE en cambio climático, gestión de cuencas hidrográficas y Evaluación Tecnológica de Necesidades (terminada en marzo de 2018), donde el Arco Seco ha sido una región de intervención ante la problemática relacionada con la calidad y cantidad de agua, y 4) el esquema de coordinación interinstitucional, que involucra a las 27 instituciones gubernamentales y academia a fin de aprovechar la red de conocimiento sobre la temática de cambio climático en sus respectivos sectores.

6.7.3.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

El PNSH es concebido como un esfuerzo nacional de mediano y largo plazo que busca representar las diversas demandas y usos del agua para la seguridad hídrica, alimentaria y energética, incluyendo el turismo recreativo, transporte marítimo y belleza escénica. Dado el complejo esquema de interacción entre las instituciones participantes, aún es necesario afianzar temas conceptuales sobre la adaptación al cambio climático para su apropiación y consideración en los planes sectoriales a fin de lograr una política institucional y de Estado más acorde a los retos actuales. A pesar de las múltiples actividades de interacción entre interesados y procesos de disseminación durante la elaboración del PNSH, sigue siendo provechoso aumentar las capacidades institucionales para una mejor internalización institucional que a su vez logre cambios sin precedentes para el aprovechamiento del recurso hídrico en armonía con el ambiente y su desarrollo nacional, así como para permitir la óptima implementación y seguimiento. También es pertinente contar con el respaldo financiero necesario para mantener la sostenibilidad de las acciones y dar celeridad a las medidas establecidas ante el cambio climático, en particular a la seguridad hídrica en Panamá.

Durante la elaboración del PNSH surgieron aspectos para su consideración como lecciones aprendidas para futu-



Retos del Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050:

- Cobertura y suministro sostenido con agua de calidad y servicios de saneamiento.
- Disponibilidad del recurso para sectores productivos ante un clima cambiante.
- Restaurar y mantener saludables las 52 cuencas hidrográficas del país.
- Mantenimiento de la creciente infraestructura nacional de agua y saneamiento.
- Evolucionar hacia una cultura de uso responsable y compartido del agua.

Figura 6.8. Retos del Plan Nacional de Seguridad Hídrica de Panamá. Fuente: elaboración propia.

ros procesos relacionados con la seguridad hídrica. Por ejemplo:

- Es necesario contar con un marco normativo, jurídico e interinstitucional acorde con los nuevos retos ambientales que se afrontan, particularmente los relacionados con la gestión del recurso hídrico y la atención al cambio climático.
- La disseminación e implementación de los resultados debe sobrepasar Administraciones a fin de asegurar la mejor sostenibilidad de las acciones. Para ello, todos y cada uno de los involucrados deben tener, entre otros factores, la definición clara de sus roles, responsabilidades y alcances.
- Es necesario fomentar la internalización de los resultados en todos los niveles de intervención nacional, particularmente hacia aquellas unidades administrativas de gobierno local o municipios donde la política institucional, implementación de acciones y planificación del territorio en general son palpables y requieren de mayor guía y acompañamiento en sus funciones cotidianas.
- El fortalecimiento de las capacidades institucionales para la atención del cambio climático debe percibirse como un proceso continuo y abarcador, donde sean involucrados aquellos sectores no tradicionales o con menor competencia en temas ambientales, partiendo de la consideración de la igualdad de responsabilidades, aunque diferenciadas.

6.7.4. Energía fotovoltaica para la extracción de agua para bebederos de camélidos en el municipio de Turco, Bolivia

6.7.4.1. Resumen

El Altiplano boliviano es un área con características climáticas singulares, siendo una región árida, con una altura superior a los 3.500 m s.n.m. La afectación del cambio y la variabilidad climática en la región tendrían un alto impacto para la población, que, por su nivel de pobreza, tiene una alta vulnerabilidad a cambios externos. El municipio de Turco, Oruro, es un lugar de base productiva camélida. Recientemente, fruto de los impactos por sequías extremas que afectan a la oferta del agua, se están desarrollando medidas de adaptación que fortalezcan la resiliencia de las comunidades locales mediante el incremento de la seguridad hídrica. La medida plantea un sistema de bombeo de agua subterránea impulsado por energía solar, el cual se implementa principalmente en sectores alejados de conglomerados urbanos donde no se cuenta con energía eléctrica. El recurso se almacena en tanques de agua que después se distribuyen a bebederos de camélidos y sirven también para el riego de humedales altoandinos. Esta estrategia no solo incrementa la seguridad hídrica de la región; es, además, una estrategia de mitigación de emisión de gases de efecto invernadero por utilizar energía solar para su funcionamiento.

6.7.4.2. Introducción a la problemática del caso

Turco es un municipio rural ubicado al oeste del Altiplano boliviano con una altura promedio de 3.860 m s.n.m., su población alcanza aproximadamente 5.207 habitantes con una proyección de 6.287 habitantes que tenía para 2018 (Gobierno Autónomo Municipal de Turco, 2017). El porcentaje de habitantes bajo la línea de pobreza es de 95,8 % y la disponibilidad de energía eléctrica, menor al 60 % (Instituto Nacional de Estadísticas, 2012). El municipio tiene tres distritos, con tres conglomerados urbanos, aunque la mayoría de la población se encuentra en unidades familiares muy dispersas a lo largo de los 3.973 km² de territorio.

La crianza y producción de llamas y alpacas en Turco es una actividad eminentemente indígena-campesina, constituyendo la principal actividad económica de sus habitantes. El impacto de la actividad productiva de camélidos en el ingreso económico de los productores es muy importante, puesto que la producción de fibra, carne y cuero aporta en promedio general 488 dólares anuales a la economía familiar (MDRyT, 2016). Para las familias de Turco, la visión de crianza de camélidos no es empresarial, sino más bien cultural y de subsistencia, con un sistema productivo tradicional desde tiempos inmemoriales y basado en el uso extensivo de praderas nativas.

Las familias criadoras de camélidos de Turco son fuertemente vulnerables a las amenazas del cambio climático debido principalmente al bajo nivel de inversión en sus sistemas productivos y a la alta dependencia de las variables climáticas. En la última década se ha registrado un incremento muy grande de emergencias relacionadas con condiciones climáticas, constatándose que el 68 % de estas son de origen hidrometeorológico (MDRyT, 2016). El clima presenta características propias del altiplano con alta radiación solar, la temperatura máxima en el año es de 26 °C y la mínima de -15 °C, con una precipitación promedio de 420 mm (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2016). Los meses secos de junio a noviembre impactan en gran medida el acceso al agua, especialmente para el ganado camélido, provocando la necesidad de caminar grandes distancias para obtener un poco de agua; esta situación se ha agravado por la presencia más frecuente de fenómenos extremos, como la sequía que devastó la región los años 2015 y 2016 (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2016) (CNN, 2016). Estudios desarrollados en el Plan Estratégico de Resiliencia climática para Vivir Bien (Centro de Apoyo a la Gestión Sustentable del Agua y el Medio Ambiente, 2016) muestran una tendencia estacional de sequía para la región hacia 2030-2050 producto del cambio climático.

6.7.4.3. Descripción del caso

La alta vulnerabilidad ante los fenómenos del cambio climático de las familias indígenas campesinas criadoras de ganado camélido, sumada a la ausencia de energía eléctrica y la dispersión de la población en un vasto territorio obligan a planificar e implementar estrategias de adaptación a escala familiar. Los sistemas de bombeo de agua subterránea con energía fotovoltaica presentan una respuesta asequible, especialmente considerando la presencia de alta radiación solar del Altiplano boliviano.

Los sistemas diseñados e implementados constan de un panel fotovoltaico (Potencia 50 Wp/12 V), un tanque de agua de 2.300 l, un pozo entubado de 15 metros promedio de profundidad, una bomba sumergible, una tubería y los bebederos para ganado camélido, los cuales se construyen con mampostería de piedra en un tamaño aproximado de 6 metros de largo por 1 de ancho (ver **Figura 6.9**).

Según información del Estudio Integral para el Gobierno Autónomo Municipal de Turco (Alurralde y Seguro, 2018), la calidad del agua subterránea se encuentra entre los rangos aceptables de calidad hídrica en la Norma Boliviana 512, teniendo un pH de 7 a 7,2 y TSD de 60 a 200 ppm. La ubicación de los sistemas se encuentra principalmente sobre el nivel cuaternario, la variación de los niveles del nivel freático es estacional y muestra estabilidad.

El promedio por hato familiar alcanza a 300 unidades de camélidos, cuyo consumo se calcula en 2 litros/cabeza, es decir, una demanda de 600 litros/día por familia.

El gobierno autónomo municipal de Turco ya ha implementado 50 sistemas y debido al significativo éxito de la medida



Figura 6.9. Sistema fotovoltaico en Turco. Fuente: fotografía de Paula Pacheco M.

se tiene planificado construir una cantidad similar a corto plazo. Si bien no se han realizado estudios hidrogeológicos específicos en la zona, el volumen de extracción de agua del acuífero no es significativo y no presentaría un riesgo para su sostenibilidad. Este supuesto se considera tomando en cuenta la demanda de agua para el ganado camélido. De acuerdo con Alurralde y Seguro (2018), los ganaderos de la región cuentan con un promedio de 300 llamas por sistema, donde el consumo diario por ganado es de 2 litros/día de agua; por lo tanto, la demanda diaria para uso pecuario por sistema es de 600 litros/día. Otra ventaja del sistema es su bajo costo, que alcanza los 6.500 dólares.

Esta estrategia se inscribe en el Plan Estratégico de Resiliencia Climática para Vivir Bien construido de forma participativa con las comunidades del Altiplano boliviano pertenecientes al sistema Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salares (Centro de Apoyo a la Gestión Sustentable del Agua y el Medio Ambiente, 2016). Esta estrategia de resiliencia climática coadyuva a la estrategia de mejoramiento de la seguridad hídrica y capacidad de adaptación.

6.7.4.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

El sistema tiene tres limitaciones: i) su utilización debe ser monitoreada y se tienen que registrar datos del comportamiento de la capa freática y la recarga del acuífero especialmente si se quiere densificar este sistema; ii) se deben realizar análisis de la calidad de agua si se requiere implementar sistemas fotovoltaicos en las cercanías de centros mineros, y iii) el logro de la sostenibilidad de la acción depende del fortalecimiento de capacidades para la gestión y mantenimiento de los sistemas, así como para garantizar el aprovechamiento del acuífero en armonía con la Madre Tierra.

El impacto de los sistemas fotovoltaicos existentes ha permitido incrementar la seguridad hídrica y la disponibilidad de agua para más de 15.000 unidades de ganado camélido, así como, la capacidad de adaptación, la resiliencia y la economía de más de 150 familias del municipio de Turco. Debido a que la implementación de estas medidas de adaptación promueve una estrategia novedosa, no existen aún lineamientos claros para la inversión estatal, debiendo circunscribirse a los lineamientos de los proyectos de riego o de manejo integral de cuencas cuyo 70 % es financiado con fondos del Estado Central, el 20 %, con fondos municipales y el 10 %, con fondos de contraparte comunal contabilizados a partir de material local y mano de obra de las personas beneficiadas. El mecanismo normativo e institucional en el que se enmarca esta medida de adaptación es la Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien (Estado Plurinacional de Bolivia, 2012). Esta ley incluye tres mecanismos: 1) mecanismo de mitigación para vivir bien; 2) mecanismos de adaptación, y 3) mecanismo conjunto. La estrategia descrita se enmarca en los mecanismos de adaptación y el mecanismo de mitigación en lo referente a la respuesta a los impactos del cambio climático, fortalecimiento de la resiliencia y utilización de energía renovable como medida de mitigación.

6.7.5. Adaptación a la variabilidad y el cambio climático a través de la captación y almacenamiento de agua de lluvia en la Cooperativa Chortitzer en el Chaco Central en Paraguay

6.7.5.1. Resumen

El estudio del caso describe la experiencia de desarrollo de tecnologías enfocadas a la adaptación ante la variabilidad del clima en el Chaco Central de Paraguay, de semiárido a subhúmedo, con una precipitación de 800 mm/año, concentrada (80 %) entre los meses de octubre-abril, sin fuentes de agua fluvial permanente y con subterránea salina. La Cooperativa Chortitzer, dedicada a la producción de leche y carne, desarrolló un sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia que le permite planear para garantizar la producción en función de la disponibilidad de agua. Se han realizado diversos experimentos para solucionar la escasez de agua, pero se ha identificado como la más ventajosa esta alternativa, inclusive la adopción de productores individuales. No así el Estado, donde se evidencia la ausencia de políticas públicas para garantizar el uso del agua en forma integral, equitativa y justa para todos.

6.7.5.2. Introducción a la problemática del caso

El Gran Chaco americano es una gran llanura distribuida entre Argentina, Paraguay, Bolivia y Brasil (ver

Figura 6.10). La región presenta marcados gradientes climáticos que determinan tres subzonas según el régimen pluvial (entre 300 y 1.200 mm) y las temperaturas medias anuales (entre 18 y 26 °C). Además de las características biofísicas, subyace la diversidad y complejidad social y cultural de la región, donde viven aproximadamente 9 millones de personas, que le dan un carácter multicultural y pluriétnico (comunidades indígenas, criollos y europeos, entre otros).

El presente estudio se localiza en el Chaco Central de Paraguay, región que presenta vulnerabilidad climática debido a los extremos (grandes inundaciones y prolongadas sequías), y donde las lluvias torrenciales pueden provocar pérdidas en la fertilidad y en la estructura del suelo, salinización e inundaciones, entre otros problemas. A su vez, las bruscas y grandes variaciones de temperatura (máximas de hasta 50 °C) pueden provocar excesiva evapotranspiración y severos daños a la producción.

La región se encuentra en la zona de transición entre los climas semiárido a subhúmedo, registra una precipitación media anual de 800 mm/año, concentrada (80 %) entre los meses de octubre-abril, una evapotranspiración potencial de 1.700 mm/año, y no posee fuentes de agua fluvial permanente y subterránea de calidad (Harder *et ál.*, 2012).

En general, los acuíferos subterráneos son salinos, salvo el agua almacenada en antiguos paleocauces que se forman mediante la infiltración de agua de lluvia (UNA-UN, 2014). Por estas razones, los productores se ven obligados a reservar agua de lluvia en tajamares o reservorios y a utilizar sistemas de cultivo de secano, siembras escalonadas, siembra directa y otras técnicas (Redes Chaco, 2012). El sector de mayor consumo de agua es la ganadería, que ocupa el 97 %, seguido por el sector forestal (1,2 %), resto de agricultura (1,07 %), algodón (0,13 %) y construcción (0,03 %). Estos resultados consideran un escenario de crecimiento económico del 6,8 % anual para el país (STP, 2014).

Un resultado relevante es que la disponibilidad de agua no constituiría una restricción al crecimiento económico debido a que el nivel de demanda de agua se mantendría por debajo de la oferta en el periodo 2021-2030. Sin embargo, se tendrían problemas de acceso al agua por falta de infraestructura y de acciones de adaptación. Esto afectaría principalmente a las comunidades indígenas y a los pequeños productores (Scribano y Cabello, 2017).

La investigación *Valorizando el agua en un clima y economía cambiantes en el Gran Chaco Americano* (Scribano y Cabello, 2017) permitió distinguir sistemas productivos que están muy vinculados al capital social de quienes habitan el Chaco Central. Uno de ellos es la captación y almacenamiento de agua de lluvia, como medida de adaptación, establecida por la Cooperativa Chortitzer.

6.7.5.3. Descripción del caso

La Cooperativa Chortitzer, ubicada en el distrito Loma Plata, fue fundada en 1927 por colonos canadienses. Los territorios inhóspitos fortalecieron en las comunidades menonitas los valores de solidaridad, ayuda mutua y cooperación. La comunidad menonita de Loma Plata cuenta con aproximadamente 9.000 habitantes, organizados en una asociación civil y una cooperativa.

Los principales ingresos de la cooperativa provienen de la producción de leche y carne. Cuenta con una capacidad de faena de 1.400 animales por semana a ciclo completo. Esta producción es garantizada por un sistema de cosecha de agua, que consta de: 1) área de captación, 2) reservorio de colecta (tajamar o laguna pulmón), y 3) reservorio de almacenamiento (ver **Figura 6.11**). El primer componente permite captar el agua de lluvia, y para construirlo se elimina la vegetación, se levantan camellones de tierra y se crean canales que conducen el agua hasta el reservorio. El reservorio o tajamar almacena temporalmente el agua captada, que posteriormente es bombeada al reservorio permanente, el

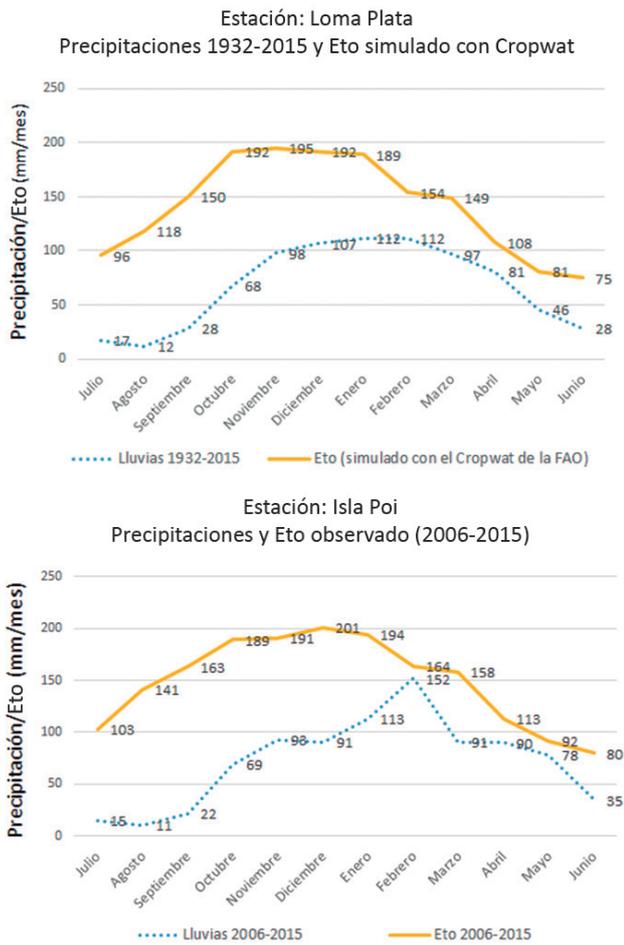


Figura 6.10. Precipitaciones y evapotranspiración potencial (Eto) en el Chaco Central. Fuente: Harder, 2017.



Figura 6.11. Sistema de captación y almacenamiento de agua. Chaco Central de Paraguay.
Fuente: Foro de Agua - INTA Sáenz Peña (Harder, 2015).

cual permite almacenar el agua hasta ser utilizada y del cual existen dos tipos: tanque australiano y reservorios elevados. El primero es usado generalmente en ganadería y el segundo, en industrias y proyectos de riego (Harder *et ál.*, 2012).

Actualmente, Chortitzer cuenta con 170 ha de áreas de cosecha, que captan entre 2.000 y 8.000 m³/ha año. Reservorios de 200.000 m³ abastecen al frigorífico para la faena de 800 animales/día, con solo 500 mm anuales de lluvias (Aquino, 2018). El Servicio Agropecuario de la Cooperativa menciona que los camellones permiten recolectar 5.000 m³/ha en años con lluvias normales (800 mm). Si las precipitaciones alcanzan solo 600 mm en el año, se logra captar 3.000 m³/ha. En años muy secos (400 mm) se puede recolectar 1.700 m³/ha (Harder, 2017).

En la ecuación tecnológica adoptada la variable que no pueden manejar es el clima, aunque han logrado estabilizar la producción a través de la planificación de sus actividades en función de la disponibilidad de agua. Cabe resaltar que tienen reserva de agua para mantener la producción (industria de carne y leche) con dos años consecutivos de sequías.

Las actividades con mayor consumo de agua son la ganadería y la agricultura asociada a esta. La ganadería consume 36,5 m³/animal/año, incluyendo evapotranspiración. En años normales, con 5.000 m³/ha, se pueden sostener 137 animales/ha, y en años extremadamente secos, con 1.800 m³/ha, solo es factible sostener 46 animales/ha. En la agricultura, el consumo depende del cultivo y la época de siembra. En general, en promedio se requieren unos 2.500 m³/

ha. En horticultura, dependiendo del sistema de producción, el cultivo y la época de cultivo, el consumo oscila entre 2.000 y 10.000 m³/ha (Harder, 2017).

El consumo per cápita varía considerablemente entre los grupos poblacionales. La población menonita consume 85 litros per cápita y día (l/hab/d) en promedio, sin incluir el riego de jardines. Se estima que la población indígena consume 33 l/hab/d y que la población latino-paraguaya consume 45 l/hab/d. Estos niveles se encuentran por debajo de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que prevé, como mínimo, el consumo de 100 litros de agua por persona/día (Red del Pacto Global Paraguay, 2015).

Otros sistemas utilizados son la colecta de agua con canaletas y la recarga artificial de acuíferos. El primero consiste en construir canaletas para llevar el agua de escorrentía natural a un tajamar. Su desventaja es que puede no abastecer con suficiente agua a las actividades agropecuarias o agroindustriales en años con poca precipitación. El segundo consiste

en excavar tajamares en lugares estratégicos donde existe agua dulce subterránea y en los cuales el agua es acumulada para que se infiltre hacia el subsuelo. Este sistema es más útil en épocas de lluvias grandes e inundaciones, ya que el agua que se puede sacar no es la misma que ha infiltrado en los pozos. En años de sequía la recarga artificial no se concreta por la falta de agua, además de observarse pérdida de agua por efecto de la capilaridad (Klassen *et ál.*, 2004).

6.7.5.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

Para toda la región del Chaco paraguayo, y en particular el Chaco Central, poder contar con disponibilidad de agua para consumo y producción ha sido un gran desafío, que implicó esfuerzos técnicos y económicos. Desde hace décadas se viene hablando de la realización, por parte del Gobierno, de un acueducto para bombear el agua del río Paraguay hasta el Chaco Central (200 km) que a la fecha no ha finalizado, lo que implicó la realización de diversos experimentos para solucionar parcialmente la escasez de agua en el Chaco y brindar alternativas a sus habitantes para acceder al agua. La Cooperativa Chortitzer cuenta con una planta de desalinización por osmosis inversa que abastece de agua potable a una parte de la población. Sin embargo, sus integrantes manifiestan el elevado costo y la complejidad que implica mantener esta tecnología (Harder, 2017).

El sector productivo más dependiente del clima es la ganadería (carne y lácteos) por la desigual distribución de la precipitación anual, lo que plantea riesgos en el acceso al recurso, en particular a los pequeños productores, quienes carecen de infraestructura para capturar y almacenar agua. La disponibilidad de agua no sería el problema, sino los elevados costos para capturarla y almacenarla. Este segmento de la población es el más afectado por la falta de políticas públicas orientadas al desarrollo inclusivo de la región.

Las tecnologías identificadas en este estudio podrían replicarse a escala más baja a fin de permitir a los pequeños productores una planificación productiva más segura, el manejo de sus cultivos y su ganado, y contribuir significativamente a la seguridad alimentaria y una mayor resiliencia ante los impactos del cambio climático. Actualmente, la captación y almacenamiento de agua que implementan como medida de adaptación las colonias del Chaco Central es la solución práctica más ventajosa, desde el punto de vista científico y económico, para contar con agua destinada a la producción y agua potable para el consumo humano. Al respecto, se puede mencionar que ya existen experiencias de productores individuales que han decidido invertir en este sistema para garantizar la disponibilidad de agua para su actividad.

Cuando se tienen en cuenta estos enfoques en el Chaco Central, se evidencia la ausencia de políticas públicas para garantizar el uso del agua en forma integral y que permitan una planificación equitativa y justa en el uso de agua entre todos los fines en los que se requiera. Por estos motivos, se considera de gran relevancia la difusión de estas tecnologías y crear espacios de intercambio de experiencias a nivel regional, enfocadas a la adopción de medidas de adaptación (tecnologías y conocimiento local), aplicables para el Gran Chaco.

6.7.6. Cambios en la operación del sistema Cantareira para hacer frente a las crisis hídricas en la Región Metropolitana de São Paulo (Brasil)

6.7.6.1. Resumen

Este estudio de caso describe las principales acciones de adaptación de carácter no estructural implementadas como consecuencia de la crisis de abastecimiento de agua que afectó a la Región Metropolitana de São Paulo entre 2014 y 2015. Se presenta una breve revisión del contexto meteorológico e hidrológico que condujo a la crisis, y se discuten los resultados de las medidas de adaptación, como el nuevo marco de concesiones para hacer frente a sequías severas.

6.7.6.2. Introducción a la problemática del caso

Entre 2014 y 2015, un gran déficit de precipitación, acompañado de temperaturas récords, que afectó a la región

Sudeste de Brasil (entre 15°25'S y 40°55'W) produjo una reducción en el agua acumulada en embalses de suministro de agua de los grandes centros urbanos de la región. Esto fue especialmente grave en la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP), donde reside el 10 % de la población brasileña (aproximadamente 20 millones de personas) y que produce un tercio del Producto Interno Bruto del país (Nobre *et ál.*, 2016). El principal sistema que abastece la Región Metropolitana de São Paulo es el sistema Cantareira, que abastece a 8,8 millones de clientes de la RMSP (Solia *et ál.*, 2007).

(a) Contexto meteorológico

Climatológicamente, las precipitaciones en la región del sistema Cantareira, conjunto de embalses que suministran agua para la RMSP, presentan máximos durante el verano (diciembre a febrero). En esta época, los sistemas que causan lluvia en el Sudeste de Brasil son la Zona de Convergencia del Atlántico Sur, la corriente en chorro de los niveles bajos al este de los Andes, que transporta humedad desde la Amazonia hacia el Sudeste de Brasil, y los frentes fríos que vienen del sur. Nobre *et ál.* (2016) muestran que la causa principal de la falta de lluvias en el verano de 2013/2014 fue la presencia de un sistema de altas presiones que se presentó en la región Sudeste de Brasil de forma anormal y que duró 47 días, de enero a febrero de 2014. Este sistema fue consecuencia de un bloqueo atmosférico que no permitió la entrada de humedad traída por la corriente en chorro de los niveles bajos y los frentes fríos del sur, y que básicamente redujo el volumen de lluvias sobre el sistema Cantareira un 62 %, determinando también temperaturas máximas 2,5 °C superiores a lo normal, siendo el verano más cálido de los últimos 60 años (Marengo *et ál.*, 2015; Seth *et ál.*, 2015; Marengo y Alves, 2016; Nobre *et ál.*, 2016; Zou *et ál.*, 2018).

La media histórica de lluvias en el periodo 1961-1990 sobre la región del sistema Cantareira en enero es de 250 mm, pero en enero de 2014 la lluvia apenas llegó a 65 mm. Según Nobre *et ál.* (2015) y Obregón *et ál.* (2014), los totales acumulados de lluvia sobre el sistema Cantareira han disminuido gradualmente desde 1990.

(b) Marco legal de concesiones y contexto hidrológico de la crisis

En 1974, se concedió una autorización para derivar hasta 33 m³/s a la Compañía de Saneamiento Básico del Estado de São Paulo (SABESP) por un periodo de 30 años. En 2004 se concedió una nueva autorización por otros 10 años entre la Agencia Nacional del Agua (ANA) y Aguas y Energía Eléctrica de São Paulo (DAEE). Esta ordenanza fue prorrogada en 2014 durante la crisis (Oliveira *et ál.*, 2015).

Según las condiciones de funcionamiento definidas en la Resolución Conjunta ANA/DAEE, los caudales máximos permitidos para SABESP no debían exceder de 31 m³/s. En el sistema se estableció una reserva estratégica del 5 %, con

base en la serie hidrológica más crítica conocida, que hasta entonces correspondía al bienio de 1953/1954.

Entre octubre de 2013 y marzo de 2014, se observaron caudales naturales excepcionalmente bajos para esa época, lo que contribuyó a que las reservas del sistema cayeran a niveles peligrosamente bajos. La **Figura 6.12** presenta el gráfico de los desvíos de los caudales medios anuales del sistema Cantareira en relación con el caudal medio de largo plazo (MLT). La figura muestra que los desvíos negativos más significativas ocurrieron en tres momentos: a) la década de 1950, cuyo bien conocido 1953/1954 fue considerado como referencia para los estudios de concesión de 2004 por ser el más crítico hasta ese momento (caudal promedio igual a 25,4 m³/s); b) en términos de duración, el periodo que comprende de 1997 a 2008, durante el cual puede verificarse una secuencia continua de años con caudales por debajo de la MLT (caudal promedio igual a 31,6 m³/s), y c) el periodo de 2012 a 2014 (caudal medio igual a 20,0 m³/s), siendo el desvío negativo del 2014 el peor del registro histórico (Oliveira et ál., 2015).

6.7.6.3. Descripción del caso

Como consecuencia de los caudales excepcionalmente bajos verificados en 2013 y 2014, en marzo de 2014 se publicó una nueva resolución conjunta de la ANA y el DAEE que dispuso sobre las condiciones especiales de operación del sistema Cantareira. En paralelo, se adoptaron varias medidas económicas, como suspender el uso de agua para riego en la cuenca. Como el sistema de distribución de agua de São Paulo tenía pérdidas del orden del 30 %, se redujo la presión de la red de distribución de agua potable. Esto trajo como consecuencia el desabastecimiento de la población durante varias horas al día, y en algunos casos durante algunos días.

Finalmente, en 2017, una nueva resolución conjunta entre la ANA y DAEE renovó la concesión para SABESP para uso del agua y la operación del sistema Cantareira por un periodo de 10 años. La nueva concesión mantiene la autorización de extracción de una media máxima mensual de hasta 33 m³/s. Con el fin de aumentar la seguridad hídrica, se definieron cinco franjas de control de captación que tienen en cuenta el volumen útil acumulado para establecer el límite de caudal de extracción autorizado.

De acuerdo con esas franjas, la descarga de agua varía entre 15,1 m³/s en la franja 1 (normal) y 33 m³/s en la franja 5 (especial) (ver **Tabla 6.5**). El nuevo marco de concesiones reconoce la importancia de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, dice la ANA. El objetivo de las bandas es garantizar que el sistema Cantareira pueda superar con éxito sequías tan o más severas como la registrada en 2014/2015 con seguridad.

Tabla 6.5. Límites de descarga en función del agua almacenada en el sistema Cantareira. *Nota:* La operación previa del sistema establecía un caudal de 33,0 m³/s independientemente del volumen útil.

Fajas	Volumen útil acumulado en el sistema	Límite de descarga
Normal	Superior al 60 %	33,0 m ³ /s
Atención	Mayor que 40 % y menor que 60 %	31,0 m ³ /s
Alerta	Mayor que 30 % y menor que 40 %	27,0 m ³ /s
Restricción	Mayor que 20 % y menor que 30 %	23,0 m ³ /s
Especial	Volumen acumulado inferior al 20 % del volumen útil	15,5 m ³ /s

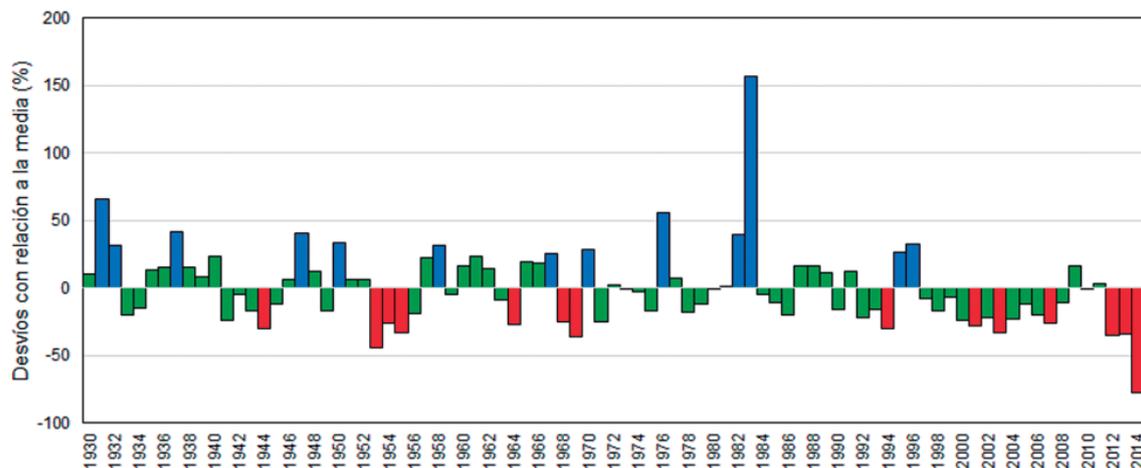


Figura 6.12. Anomalías de los caudales medios anuales de sistema Cantareira. Se presentan los cambios respecto de las condiciones promedio (en %). En azul, valores sobre +25 %. En verde, valores entre -25 % y +25 %. En rojo, valores bajo -25 %. *Fuente:* basado en Oliveira et ál. (2015).

La nueva resolución también establece un plazo para que SABESP presente un plan y un cronograma de actividades para la implantación de mejoras al sistema Cantareira. Según el organismo, será exigido, entre otras cosas, la ampliación y modernización de la red de puntos de monitoreo de lluvia y caudal del sistema, la mejora de los equipos de control de niveles y caudales de los depósitos, y un proyecto de gestión de la demanda con control de la demanda y pérdidas físicas. También están previstas las exigencias del incentivo al uso racional y al reciclado del agua, un plan para un eventual uso del volumen muerto y la ampliación de proyectos para reducir la erosión y la sedimentación, así como para mejorar la captación e infiltración del agua de lluvia.

6.7.6.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

La política de concesión por fajas de operación es un nuevo paradigma para el uso de los recursos hídricos en el Brasil. Esta nueva política está siendo utilizada en el río São Francisco, donde también ocurrió una sequía de carácter excepcional, y abre precedentes legales que permiten un uso más sustentable del recurso hídrico. En un país con un pasado histórico caracterizado por abundancia ilimitada, este cambio de paradigma representa un importante avance.

Lemos *et ál.* (2017) analizaron las distintas estrategias de actuación adoptadas por SABESP frente a la crisis hídrica, como la ruptura de paradigmas en la operación del sistema de abastecimiento, la generación de nuevos aprendizajes bajo nuevos escenarios hídricos, el fortalecimiento del proceso de planificación y la gestión y minimización de los impactos a los clientes, la sociedad y demás partes interesadas. La **Tabla 6.6** ilustra los principales resultados de las medidas adoptadas.

Desde el punto de vista de cambios en los paradigmas, podemos destacar que la crisis de 2013/2014 modificó la cultura de distribución del agua para enfrentar la escasez hídrica, adoptando mecanismos de gestión de la demanda tales como la reducción de la presión en la red para minimizar los cortes en el suministro. Es de esperar que este nuevo

esquema mejore la capacidad de enfrentar los futuros escenarios de escasez que puedan ocurrir producto del cambio climático en la región.

A modo de cierre, se puede destacar que, en mayo del 2019, la ciudad de São Paulo promulgó la ley municipal n.º 17104, que instituye la política municipal de seguridad y gestión de las aguas en el municipio. Aparte de las acciones normativas relativas de revitalización y conservación de las fuentes de abastecimiento y distribución, la ley establece que la promoción de la seguridad hídrica deberá observar aspectos relacionados con la adaptación a los cambios climáticos.

6.7.7. Desarrollo de infraestructura resiliente a los impactos del cambio climático en la provisión de agua potable en la ciudad de Santiago de Chile

6.7.7.1. Resumen

El agua potable es el agua que cumple una normativa de calidad que permite ser consumida sin riesgo para la salud de la población. Cada vez que existen interrupciones en el servicio de provisión de agua potable se destaca su relevancia. Las causas de dichas interrupciones son variadas, entre las que se incluye más recientemente el cambio climático. La aparición de eventos con altas turbiedades en las fuentes superficiales de abastecimiento de agua potable es uno de esos fenómenos que provocan el cierre de plantas de tratamiento y, por ende, la interrupción del servicio. Eventos de este tipo, que están ocurriendo en la ciudad de Santiago de Chile, son un fenómeno nuevo que ha ido haciéndose más frecuente en los últimos años, lo que ha obligado a la empresa sanitaria responsable del servicio a estudiarlo, analizar su evolución con objeto de implementar medidas de adaptación que disminuyan los riesgos de los indeseables cortes de suministro que tanto daño ocasionan a la población y a la imagen de la empresa. En este caso de estudio se muestran las estrategias que se han implementado para responder a estos desafíos, principalmente en términos de nueva infraestructura, y se plantean los desafíos para el futuro en el contexto de una empresa privada que provee un servicio crítico para la población.

6.7.7.2. Introducción a la problemática del caso

La provisión de recursos hídricos se ve afectada claramente tanto por la falta de disponibilidad de agua (sequía) como por la ocurrencia de eventos extremos que pueden tener un origen en condiciones climáticas cambiantes. Una de las alternativas para hacer frente a estas condiciones climáticas consiste en construir infraestructura que sea resiliente a

Tabla 6.6. Resultados de las medidas adoptadas. (Fuente: Lemos *et ál.*, 2017)

Principales resultados	2013	2014	2015	2016
Número de reclamaciones por falta de agua	99.516	86.248	83.740	52.544
Tiempo medio de reparación de fugas	n/c	82 horas	26 horas	22 horas
Índice de pérdidas en la red (litros/conexión/día)	515	507	495	394

ellas. La complejidad está en poder adelantarse a los impactos provocados por esas condiciones climáticas y diseñar infraestructuras que consideren el alto nivel de incertidumbre asociado.

En el presente caso de estudio se expone la situación vivida a partir del año 2008 en la ciudad de Santiago de Chile, en la que eventos climáticos han elevado a niveles altísimos, y por periodos prolongados de tiempo, la turbiedad en la principal fuente de abastecimiento de agua potable de la ciudad, el río Maipo, provocando el cierre de las plantas de tratamiento y, con ello, la interrupción del servicio. Esta situación ha obligado a la empresa de servicios sanitarios a cargo del sistema de abastecimiento a desarrollar una infraestructura resiliente para evitar la discontinuidad del servicio.

6.7.7.3. Descripción del caso

Santiago de Chile, capital y ciudad más importante del país, está situada a los pies de la cordillera de los Andes, cuenta con alrededor de 7 millones de habitantes y produce casi el 40 % del PIB total de la nación. La ciudad se encuentra situada en el corazón de la cuenca del Maipo, río que recorre aproximadamente 250 km desde la cordillera hasta el océano Pacífico, y suministra del orden del 80 % del agua potable para la ciudad. Dado que la precipitación en esta zona es baja (alrededor de 300 mm/año) y restringida al periodo invernal (junio a septiembre), el suministro de agua para Santiago depende en gran medida de la cantidad de nieve caída en esos meses y del deshielo que puede acumularse en el embalse del Yeso, con capacidad de 220 millones de m³. El 20 % restante requerido para el abastecimiento de agua potable proviene en un 8 % del río Mapocho y en un 12 % del acuífero de Santiago, cuya recarga depende en gran medida de las condiciones climáticas.

El consumo promedio per cápita en la ciudad de Santiago es de 138 l/hab/día, con sectores en que el consumo puede llegar a los 449 l/hab/día, como en barrios residenciales con población de altos ingresos (SISS, 2016). En Santiago la cobertura de agua potable y saneamiento alcanza al 100 %, siendo el Grupo Aguas el proveedor principal del servicio sanitario, que abastece de agua potable al 90 % de la población (10 % restante, otras empresas menores) y trata el 100 % de las aguas servidas a los habitantes de la ciudad (SISS, 2016). La producción del Grupo Aguas tiene un destino principalmente residencial, aproximadamente un 74 %, mientras que el 26 % restante está dirigido a usos industriales, comerciales, y riego de parques y jardines.

El río Maipo, principal fuente de abastecimiento, tiene un caudal promedio de alrededor de 90 m³/s y un régimen dominado por el deshielo, con valores máximos a finales de primavera (diciembre). No obstante, los caudales suelen aumentar en el periodo mayo-agosto con la llegada de las lluvias invernales.

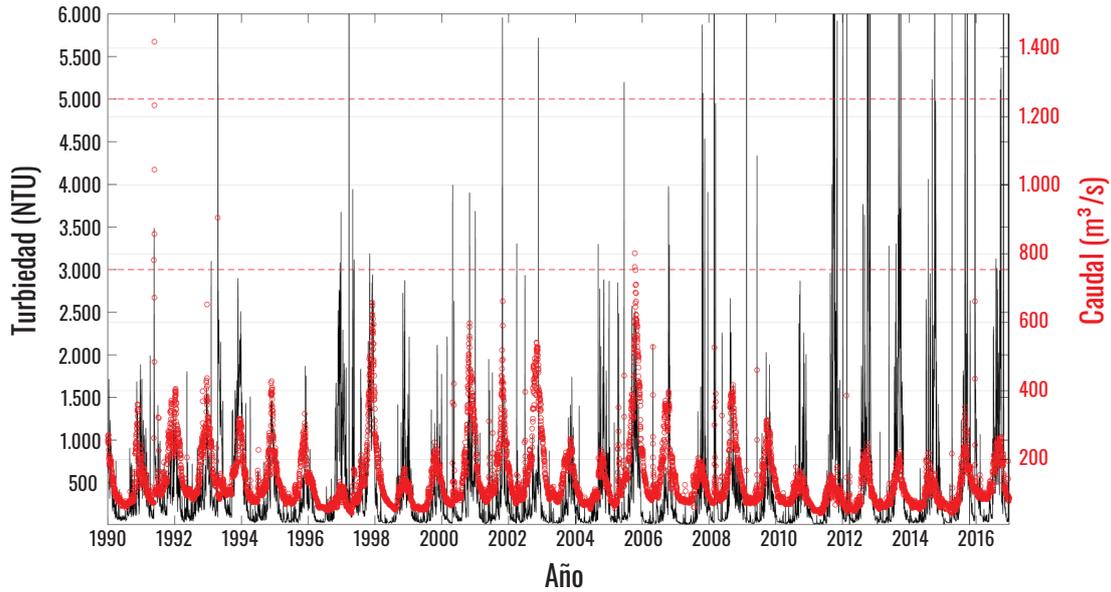
La prolongada sequía que ha presentado Santiago en los últimos años (periodo 2010-2018), el aumento de la tem-

peratura en la zona cordillerana y la ocurrencia de eventos de alta turbiedad en el río Maipo han puesto en alerta a la empresa sanitaria Aguas Andinas, principal compañía del Grupo Aguas, respecto de las acciones a considerar con objeto de enfrentar con éxito el desafío impuesto por estos eventos asociados al clima, como también al aumento de la demanda por crecimiento de la población (Ocampo-Melgar et ál., 2016; Vicuña et ál., 2018; Garreaud et ál., 2019).

Conviene señalar que, a partir del año 2008, los eventos de turbiedad extrema presentados en el río Maipo han provocado cortes en el suministro de agua potable al tener una duración superior a la autonomía del sistema de abastecimiento ante el obligado cierre de las plantas de tratamiento. Una posible causa de estos eventos de alta turbiedad se puede asociar al aumento en los niveles de temperatura en la zona cordillerana, elevando la isoterma de 0°, con lo cual existe una mayor superficie expuesta a la erosión al recibir precipitación líquida en lugar de precipitación de nieve. Este fenómeno, conocido como tormentas cálidas, es plausible que esté asociado a una expresión temprana de cambio climático, especialmente producto del aumento de temperaturas (ver Garreaud, 2013; y Vicuña et ál., 2013). La **Figura 6.13** muestra la serie de tiempo de caudales diarios y de niveles de turbiedad en el río Maipo. Se presenta también una tabla con el registro de todos los eventos en que se ha superado el nivel de turbiedad de 3.000 NTU, que marca el límite superior de operatividad de la planta de tratamiento en Las Vizcachas, principal planta de agua potable de la ciudad de Santiago. Se aprecia cómo a partir del año 2012 ha aumentado de manera considerable la cantidad de eventos con altos niveles de turbidez, teniendo duraciones que en algunos casos superan las 100 horas (duración del evento con niveles superiores a 3.000 NTU).

Conviene señalar que la duración que proveen las tablas es de todo el evento, y la turbiedad es un promedio durante todo ese periodo. Solo cuando la duración del evento mantiene en forma continua altas turbiedades se debe proceder al cierre de planta. Si ese periodo de cierre supera la autonomía del sistema, es decir, cuando los estanques de regulación a la salida de planta y distribuidos en la ciudad se vacían, se provocan los indeseables cortes en el servicio. La duración de este corte depende entonces de la duración de las altas turbiedades en el río por la puesta en operación de las plantas y el llenado de estanques, todo lo cual puede significar un número importante de horas.

En la **Figura 6.14** se muestra cómo ha sido el aumento de eventos con más de 12 horas de duración con turbiedad superior a 5.000 NTU. Puede observarse que en el periodo 1990-2007, es decir, en 18 años, hubo 6 eventos, de los cuales solo uno significó un corte de suministro (líneas rojas). En el periodo 2008-2012, esto es, en los 5 años siguientes, el número de eventos aumentó a 8, uno de los cuales significó un corte de servicio. Finalmente, en el último periodo, entre los años 2013-2017, otros 5 años, ya se presentaron 29 episodios que significaron 5 cortes de suministro. El último de estos cortes, ocurrido el 21 de



Periodo	Número de eventos	Duración promedio (horas)	Máxima Turbiedad Promedio (NTU)
1995-1999	2	53	51.775
2000-2004	5	29	6.760
2005-2009	6	30	26.225
2010-2014	13	63	52.185
2015-2017	7	68	62.114

Figura 6.13. Caudales medios diarios y niveles de turbidez en río Maipo, en Manzano. Fuente: Aguas Andinas y estación fluviométrica Maipo, en El Manzano (DGA).

abril de 2017, afectó a 733.488 clientes (aproximadamente 3 millones de personas).

En la **Figura 6.14** se muestran también las obras que representan la manera en que ha respondido Aguas Andinas a estos eventos con el objeto principalmente de aumentar sus horas de autonomía. Desde que se presentó el corte de suministro en el año 2008, se definieron obras que, dado lo sucedido en los años siguientes, se han identificado como de Fase I, y que comprendieron básicamente varias infraestructuras. Una de ellas es CAYA, conducción-acueducto desde el embalse de El Yeso al acueducto Laguna Negra, el cual conduce aguas de los rebalses de Laguna Negra hasta Planta Vizcachas. Corresponde a una conducción de 5 km de longitud y con capacidad de 3,8 m³/s, pero para una operación segura de 3 m³/s permite, a pesar de estar cerrada la entrada a la planta por turbiedad del río, conducir agua desde el embalse directamente a la planta para ser tratada. Esta obra más la construcción de estanques con capacidad 225.000 m³ y pozos con capacidad de producción de 300 l/s permitieron aumentar la autonomía de 4 a 9 horas. Sin embargo, tal como muestra la **Figura 6.14**, los fenómenos de alta turbiedad continuaron provocando nuevos cortes a partir del año 2013, lo que motivó la planificación de una nueva infraestructura, que se ha denominado de Fase II y que básicamente es la construcción de 6 estanques de agua

en su condición natural sin tratar (agua cruda) con capacidad de 1,5 Mm³, con lo cual se aumenta la autonomía en el suministro de 9 a 32 horas. Se espera la entrada en operación de esta obra a finales del año 2019, con lo que se daría mayor seguridad en el suministro ante eventuales fenómenos de alta turbiedad en el río.

6.7.7.4. Conclusiones: limitaciones, interacciones y lecciones aprendidas

En este caso de estudio se ha presentado cómo una empresa de suministro de agua potable ha tenido que ir reaccionando a eventos climáticos extremos a través del diseño e inversión en infraestructura. Sin embargo, los fenómenos de turbiedad (u otro evento hidrometeorológico extremo) provocados por condiciones climáticas cambiantes tienen asociado un alto nivel de incertidumbre, por lo que se deben evaluar alternativas por si los episodios siguen aumentando en frecuencia y duración. En el caso concreto de la ciudad de Santiago, dichas alternativas van desde la construcción de infraestructura adicional, con un nuevo estanque para lograr 48 horas de autonomía (por encima de las 32 horas de autonomía que genera la obra actualmente en construcción), un

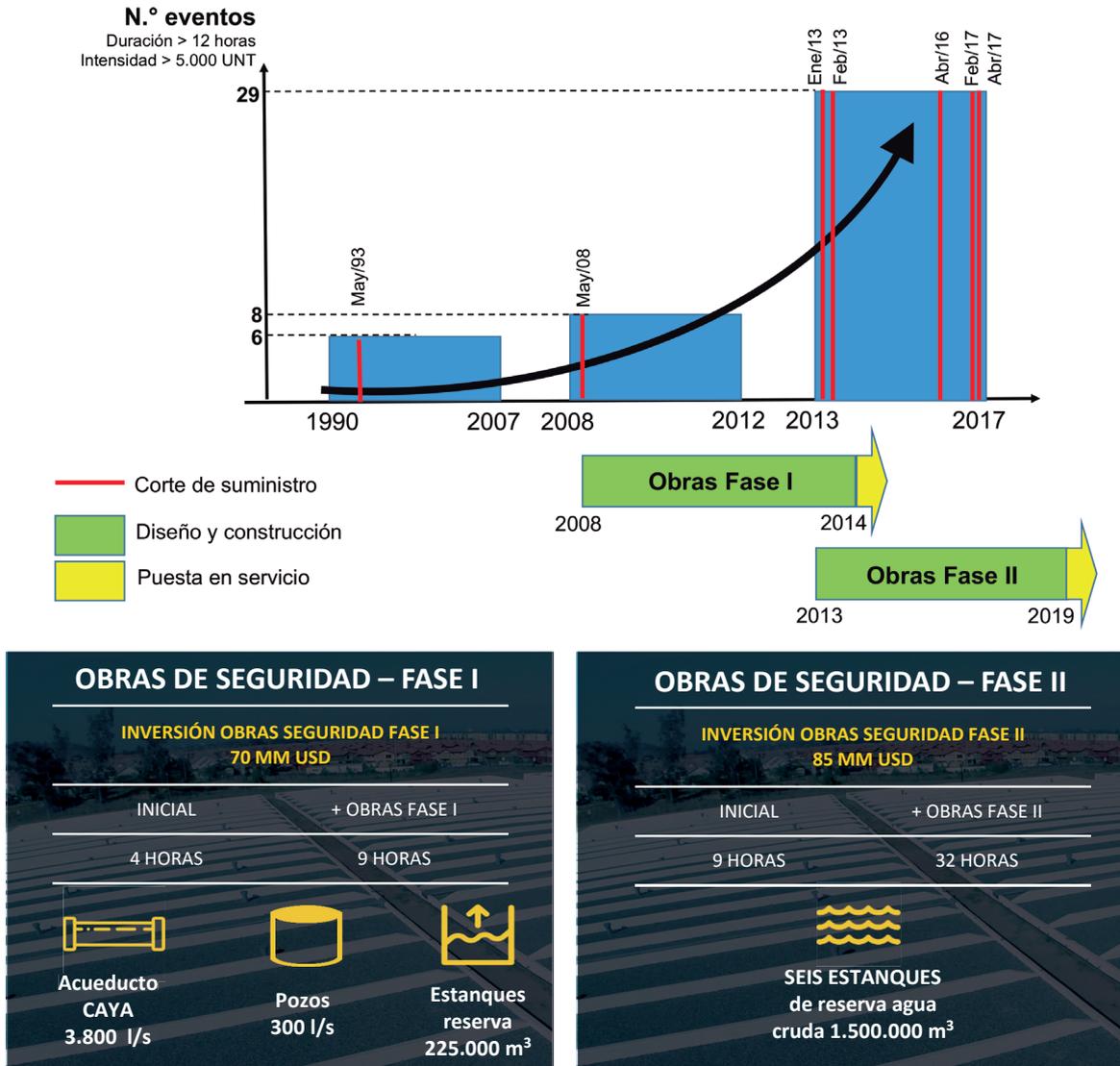


Figura 6.14. Caudales medios diarios y niveles de turbidez en el río Maipo, en Manzano. Fuente: Aguas Andinas.

nuevo embalse o definitivamente ir a una autonomía máxima instalando una conducción directa desde el embalse El Yeso hasta la planta Las Vizcachas.

Conviene señalar que la construcción de las obras de las Fase I y Fase II, dada la necesidad imperiosa de garantizar la seguridad en el abastecimiento, escapan al procedimiento normal de planificación que deben cumplir las empresas sanitarias en Chile. En efecto, dicho cumplimiento corresponde a los denominados planes de desarrollo, que son la principal herramienta con que cuenta el sector sanitario en la relación empresa-regulador, para evaluar, identificar y programar las obras que permiten satisfacer la demanda de los servicios de agua potable y aguas servidas asegurando

la oportuna ejecución de las obras y, por tanto, la calidad del servicio en el mediano y largo plazo. Al ente regulador, la Superintendencia de Servicios Sanitarios-SISS, le corresponde pronunciarse respecto de estos planes que le son presentados cada 5 años, que son elaborados con un horizonte de 15 años, para posteriormente controlar el cumplimiento de los respectivos cronogramas de inversión.

Si bien el sector sanitario ha podido definir a través de los planes de desarrollo la infraestructura que ha requerido para cumplir con los estándares de servicio que le han sido exigidos, la situación vivida en la ciudad de Santiago con los eventos de alta turbiedad en el río Maipo, así como la sequía que ha afectado a gran parte del país o inundaciones

que se prevén por efecto del cambio climático, han obligado a considerar en dichos planes la incertidumbre que estos fenómenos representan para lograr anticipar su ocurrencia y aminorar el riesgo de afectar el servicio. Este nuevo enfoque merece una evaluación que considere los costos asociados a la reducción de resiliencia en los casos de fenómenos difíciles de predecir, como son los que está demostrando el cambio climático.

6.8. Principales lagunas de conocimiento y líneas de acción prioritarias

Dado el nivel de interconexión que existe entre los recursos hídricos y muchos otros sectores y sistemas, el conocimiento respecto de las amenazas y riesgos asociados a los recursos hídricos es relativamente grande en comparación con otros sectores. Sin perjuicio de lo anterior, existen todavía vacíos importantes en entender algunos procesos hidrológicos clave, como por ejemplo, la relación entre clima y aporte de agua desde glaciares o las relaciones que existen entre cambios en las precipitaciones, consumos y efectos en aguas subterráneas. El monitoreo de los niveles de precipitación y temperatura, caudales y extracciones de aguas superficiales y subterráneas debe ser una acción prioritaria, ya que mejorar el conocimiento de estos procesos a la vez apoya la correcta implementación de medidas de adaptación. Considerando los impactos del cambio climático respecto de la disponibilidad de recursos hídricos en Iberoamérica, un foco importante de acción debe estar en aquellas zonas de clima semiárido y aquellas que dependen de la acumulación y derretimiento de nieve y glaciares.

Por otra parte, dadas las necesidades de infraestructura para apoyar el creciente desarrollo de la región en términos de uso de agua para las ciudades, la agricultura y la generación de energía, se requiere investigación que apoye al análisis económico de los costos y beneficios asociados a estos proyectos, considerando la incertidumbre de largo plazo asociado a los escenarios de cambio climático. Se debe considerar en estos análisis el rol que pueden tener las infraestructuras descentralizadas y flexibles, como por ejemplo, los sistemas de cosecha de agua. Estos análisis deben ser capaces también de considerar el rol que tienen los cambios en los patrones de consumo y el efecto de una buena cultura de agua, así como también entender las conexiones que existen entre la adaptación y mitigación del cambio climático, especialmente en torno al nexo agua, energía y alimentos.

6.9. Conclusiones

El sector de recursos hídricos tiene en la actualidad diferencias importantes en términos de disponibilidad de

recursos en un contexto donde el empleo de agua para la agricultura es su principal uso en la región. Estas diferencias tienden a acentuarse, producto de los riesgos del cambio climático, especialmente debido a una reducción en las precipitaciones en zonas donde hoy ya existen recursos limitados, como parte importante de la cuenca del Mediterráneo, Mesoamérica, el norte de América del Sur, el Nordeste de Brasil y la diagonal semiárida que conecta la zona centro norte de Chile con la zona centro sur de Argentina, entre otros. Esta situación se ve exacerbada con otros riesgos asociados a la reducción del aporte de recursos por el retroceso de los glaciares e impactos en la calidad del agua y eventos extremos que impiden la extracción de recursos para distintos usos.

Del análisis de la bibliografía y de los casos de estudio presentados se puede concluir que existen variadas formas de implementar medidas de adaptación a escalas individuales, comunitarias, urbanas o rurales. Estas medidas pueden ser implementadas tanto a nivel de la provisión como de la demanda de recursos hídricos. Y pueden afectar a distintos componentes de la seguridad hídrica en términos de sostener los medios de vida, proteger los ecosistemas y asegurar el desarrollo socioeconómico.

En un contexto en el que el agua se va haciendo cada vez más un bien escaso, con disponibilidad incierta, se pueden destacar dentro de las medidas de adaptación las experiencias respecto del suministro de agua en comunidades rurales sobre sistemas de captura de agua lluvia. También sobresalen los planes de adaptación con foco en los recursos hídricos a escalas nacionales, regionales y locales que incluyen escenarios climáticos futuros y medidas de adaptación para hacer frente a estos impactos. Y, finalmente, destacan las experiencias relacionadas con cambios en el diseño y la operación de la infraestructura de suministro de agua potable para hacer frente a escenarios de cambio climático.

Una correcta implementación de estas medidas de adaptación podría hacer frente a las amenazas del cambio climático en términos de los patrones de precipitación y cambios en la temperatura que pueden afectar en conjunto a la disponibilidad de recursos hídricos. Sin embargo, para asegurar esta correcta implementación, es importante entender los vínculos existentes entre los distintos sectores. Por ejemplo, entender el nexo agua, energía y alimentos es clave para generar interacciones virtuosas y cobeneficios en el diseño de medidas de adaptación. Por otra parte, la planificación y colaboración a todas las escalas (comunidad, cuenca y país) es fundamental para definir estrategias exitosas. Estas estrategias también deben ser definidas contando con la información (riesgos, amenazas) y herramientas de decisión adecuadas. Finalmente, se deben eliminar una serie de restricciones a nivel institucional con el fin de incorporar de manera más simple las medidas de adaptación en relación con la gestión de los recursos hídricos.

Preguntas frecuentes

1. ¿Los glaciares en los Andes se están derritiendo de manera acelerada como resultado del cambio climático?

Los glaciares en los Andes son una fuente de recursos hídricos muy relevante, especialmente para la población y otros usos en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes. Producto del alza en la temperatura asociada al cambio climático, este aporte de recursos ha estado modificándose y se espera que en el futuro esto pueda tener importantes consecuencias en la región.

2. ¿Cuáles son los impactos asociados a una disminución de las tasas de precipitación producto del cambio climático?

Al disminuir las tasas de precipitación y crecer las necesidades de evapotranspiración (producto del aumento en temperatura) disminuyen la cantidad de escorrentía, el caudal de los ríos y la infiltración a acuíferos, lo que afecta a la disponibilidad de recursos hídricos para distintas actividades.

3. ¿Es posible diseñar infraestructura que permita hacer frente a los escenarios de cambio climático?

Sí, es posible, pero lo complejo es poder considerar la incertidumbre en los escenarios para realizar un diseño que responda a distintos tipos de desafíos sin ser al mismo tiempo excesivamente costoso.

4. ¿Cuál es el rol que tiene la demanda de recursos hídricos en el diseño de medidas de adaptación?

La satisfacción de la seguridad hídrica asociada al uso del agua como recurso tiene relación con la provisión de estos recursos en función de la precipitación, los ecosistemas y las obras de infraestructura. Sin embargo, la satisfacción también tiene relación con la necesidad o demanda de estos recursos. Existen diversas oportunidades de adaptación que permiten satisfacer la seguridad hídrica, pero con un consumo de recursos hídricos más eficiente.

Agradecimientos

La versión original del **caso de estudio 6.7.2** fue publicada en acceso abierto en Scott (2013). Parte del apoyo de financiamiento para esta investigación proviene del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (proyecto SGP-CRA #005, apoyado por la National Science Foundation de los Estados Unidos, proyecto NSF N.º GEO-1138881) y por los proyectos NSF N.ºs DEB-1010495 y EFRI-0835930. Gracias a América Lutz por el apoyo con la adquisición de datos, a Yulia Peralta por la traducción inglés-español del

texto, así como a Giancarlo Calbimonte por la conversión y traducción de las figuras.

Bibliografía

ABES-FENASAN, 2017: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental e Feira Nacional de Saneamento de Meio Ambiente, São Paulo.

Agua Potable de Los Cabos: sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://aguapotabledeloscabos.gob.mx/planta-desaladora/>

Aguilar, G., L.I. Salazar, J. Pérez Fernández y F. Picado, 2016: *Una nueva Regionalización Climática de Panamá como aporte a la seguridad hídrica*. Panamá. MIAMBIENTE. Disponible en: <https://www.cathalac.int/publicaciones/regiones-climaticas-panama.html>

Aguirre, N., J. Torres y P. Patricia Velasco-Linares, 2013: *Guía metodológica restauración de páramos*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Gu%C3%ADA-Metodol%C3%B3gica-restauracion-p%C3%A1ramos.pdf>

Alurralde, J.C. y J. Seguro, 2018: *Diseño técnico de pre-inversión identificación, validación y diseño final de proyectos de provisión de agua fotovoltaico y bebederos para ganado camélido*. Gobierno autónomo municipal de Turco. Centro de Apoyo a la Gestión del Agua y el Medio Ambiente La Paz.

Álvarez, A. y R. Gutiérrez: *Paso a paso en la adaptación al cambio climático en cuatro municipios del departamento de Madriz y la Costa Caribe Norte Nicaragüense*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://climatecentre.org/downloads/files/Case%20studies/ACC%20FINAL.pdf>

ANAM, 2007: Política Nacional de Cambio Climático. Editorial. Oficina de Planificación y Política Ambiental. Aprobada por Decreto Ejecutivo n.º 35 de 26 de febrero de 2007. Editorial Novo Art, 40 pp.

ANAM, 2011: *Atlas Ambiental de la República de Panamá*. Panamá, ISBN: 9789962651499. Disponible en: http://www.somaspa.org/noticias/Atlas_Ambiental.pdf

ANAM, 2011: Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la República de Panamá (PNGIRH) 2010-2030, financiado con recursos no reembolsables del Programa de Alianza Banco Interamericano de Desarrollo (BID)-Países Bajos para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. ISBN: 978996260977-3. Disponible en: http://www.anam.gob.pa/images/stories/plan_nacional/index.html

ANAM, 2013: *Las aguas subterráneas de la Región del Arco Seco y la Importancia de su conservación*. Panamá, ISBN: 9789962651802.

Aquino, J., 2018: *Solventa, Calificación de Riesgos*. <http://www.solventa.com.py/wp-content/uploads/2013/10/Informe-La-Consolidada-2018.pdf>

Banco Mundial, 2019: sitio web consultado en septiembre de 2019, <https://datos.bancomundial.org/>

Boden, T.A., G. Marland y R.J. Andres, 2013: *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn, USA, DOI:10.3334/CDIAC/00001_V2011

Bonelli, S., S. Vicuña, F.J. Meza, J. Gironás y J. Barton, 2014: *Incorporating climate change adaptation strategies in urban water*

- supply planning: the case of central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5(3), 357-376.
- Brito-Castillo, L.**, 2012: *Regional pattern of trends in long-term precipitation and stream flow observations: singularities in a changing climate in Mexico*. Greenhouse Gases-Emission, Measurement and Management, 387-412 [Liu, G. (ed.)] (Rijeka: InTech), 504 pp.
- Carmona, A. M. y G. Poveda**, 2014: Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123(2), 301-313.
- CATHALAC**, 2015: Seguridad hídrica y cambio climático, un estudio comparativo del estado de derecho y la gestión del agua, desde lo internacional a lo local. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <http://www.cathalac.int/jdownloads/cambio-climatico/Seguridad%20Hidrica%20y%20Cambio%20Climatico%20estudio%20comparativo%20web.pdf>
- CATHALAC**, 2016: *Una nueva Regionalización Climática de Panamá como aporte a la seguridad hídrica*. Trabajo de la División de Investigación Aplicada y Desarrollo. MiAMBIENTE, Panamá, ISSN en trámite.
- CCG**, Maipo Plan de Adaptación. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://www.maipoadaptacion.cl>
- CEDEX**, 2012: *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. Sitio web consultado el 3 de mayo de 2019, http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/ImpactosCC_2012.htm
- CEDEX**, 2017: *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Informe técnico Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX, tomo único, clave CEDEX 42-415-0-001. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. Sitio web consultado el 20 de julio de 2018, http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/EvaluacionImpactoCCsequiasEspaña2017.htm
- Centro de Apoyo a la Gestión Sustentable del Agua y el Medio Ambiente**, 2016: *Vulnerabilidad y resiliencia en el Altiplano boliviano* (2.ª ed.). La Paz, Bolivia.
- Centro Regional para el Desarrollo a la Investigación (IDRC)/Investigación para el Desarrollo (Id)**, 2017: *Investigación Valorizando el agua en un clima y una economía cambiante en el Gran Chaco Americano*.
- CFE** (Comisión Federal de Electricidad), 2013: *Estadísticas de Ventas*, <http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/QCFE/EstVtas/Default.aspx>
- CGIAR**, *Territorios Sostenibles Adaptados al Clima*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://ccafs.cgiar.org/es/territorios-sostenibles-adaptados-al-clima/#bMUJuhKjb0>
- Chavez-Jimenez, A., A. Granados, L. Garrote y F. Martín-Carrasco**, 2015: Adapting water allocation to irrigation demands to constraints in water availability imposed by climate change. *Water resources management*, 29(5), 1413-1430.
- CNN**, 7 de octubre de 2016: CNN en Español. Sitio web consultado en 2018, <https://cnnespanol.cnn.com/2016/10/07/bolivia-vive-una-de-las-peores-sequias-de-los-ultimos-25-anos/>
- Coelho, C.A.S., D.H.F. Cardoso y M.A.F. Firpo**, 2016a: Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theor Appl Climatol*, 125(3), 769-784. DOI: 10.1007/s00704-015-1540-9
- Coelho, C.A.S., C.P. de Oliveira, T. Ambrizzi, M.S. Reboita, C.B. Carpenedo, J.L.P.S. Campos, A.C.N. Tomaziello, L.A. Pampuch**, M.D.S. Custódio, L.M.M. Dutra, R.P. Da Rocha y A. Rehbein, 2016b: The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim Dyn*, 46(11), 3737-3752, DOI: 10.1007/s00382-015-2800-1
- CONAGUA** (Comisión Nacional del Agua), 2013: Registro Público de Derechos de Agua, www.conagua.gob.mx/Repda.aspx
- Conservación Internacional: Adaptación al cambio climático en la alta montaña**. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <http://www.conservation.org.co/programas/Aguas-y-ciudades/articulos-rios-lagunas/ADAPTACI-N-AL-CAMBIO-CLIM-TICO-EN-ALTA-MONTA-A>
- Cortés, G., X. Vargas y J. Mcphee**, 2011: Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*, 405(1-2), 93-111.
- Dai, A., T. Qian, K.E. Trenberth y J.D. Milliman**, 2009: Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, 22(10), 2773-2792.
- Del Vasto-Terrientes, L., V. Kumar, T.C. Chao y A. Valls**, 2016: A decision support system to find the best water allocation strategies in a Mediterranean river basin in future scenarios of global change. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 28(1-2), 331-350.
- De Lira Azevêdo, E., R.R.N. Alves, T.L.P. Dias y J. Molozzi**, 2017, How do people gain access to water resources in the Brazilian semiarid (Caatinga) in times of climate change? *Environmental monitoring and assessment*, 189(8), 375.
- Departamento del Valle del Cauca**, 2018: *Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, https://ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/plan_integral_de_cambio_climatico_para_el_valle_del_cauca.pdf
- Di Giulio, G.M., A.M.B. Bedran-Martins, M. da Penha Vasconcellos, W.C. Ribeiro y M.C. Lemos**, 2018: Mainstreaming climate adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil. *Cities*, 72, 237-244.
- Di Niro, M.** 2007: *Colonia Mennonita del Chaco Paraguayo: Colecta de agua con una superficie de captación de agua*.
- Drenkhan, F., M. Carey, C. Huggel, J. Seidel y M.T. Oré**, 2015: The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715-733.
- Eakin, H. et ál.**, 2016: Adapting to risk and perpetuating poverty: household's strategies for managing flood risk and water scarcity in Mexico City. *Environmental science & policy*, 66, 324-333.
- ECLAC**, 2009: *La Economía del Cambio Climático en Chile: Síntesis*. LC/W.288. Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), Santiago de Chile, Chile, 88 pp.
- EIA**, 2019: sitio web consultado en septiembre de 2019, www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=74&t=11
- El Milenio**, 2012: www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/215cf5be355aeb0b371d1f895d4e84e4
- Engle, N.L. y M.C. Lemos**, 2010: Unpacking governance: building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 20(1), 4-13.
- Engle, N.L., O.R. Johns, M.C. Lemos y D.R. Nelson**, 2011: Integrated and adaptive management of water resources: tensions, legacies, and the next best thing. *Ecology and Society*, 16(1), 19, www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art19/main.html

- Equipo Nacional de Pastoral Aborigen (ENDEPA)**, 2011: *Informe sobre la situación de los pueblos indígenas en Argentina: La agenda pendiente*.
- Escriva-Bou, A.**, M. Pulido-Velazquez y D. Pulido-Velazquez, 2017: The economic value of adaptive strategies to global change for water management in Spain's Jucar Basin. *J. Water Resources Planning and Management*, 143(5), 1-1. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000735
- Estado Plurinacional de Bolivia**, 2012, Ley Marco de la Madre Tierra y desarrollo integral para vivir bien. Bolivia.
- Esteve, P.**, C. Varela-Ortega, I. Blanco-Gutiérrez y T.E. Downing, 2015: A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120, 49-58.
- Fader, M.**, S. Shi, W.V. Bloh, A. Bondeau y W. Cramer, 2016: Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 953-973.
- Falkenmark, M.** (1989). The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed? *Ambio*, 18: 112-118.
- FAO**, 2013: *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*, <http://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>
- FAO-Aquastat**, 2019: sitio web consultado en septiembre de 2019, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>
- Fortner, S.K.**, B.G. Mark, J.M. McKenzie, J. Bury, A. Trierweiler, M. Baraer, P.J. Burns y L. Munk, 2011: Elevated stream trace and minor element concentrations in the foreland of receding tropical glaciers. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1792-1801.
- Fundación Nacional para el Desarrollo**, sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <http://www.funde.org/promoviendo-la-cosecha-de-aguas-lluvias-como-alternativa-de-adaptacion-al-cambio-climatico-y-mejora-de-las-condiciones-de-vida-en-las-comunidades-del-valle-del-jiboa>
- Gao, X.** y F. Giorgi, 2008: Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), 195-209.
- García, J.M.**: Sobre las medidas de adaptación de los recursos hídricos cubanos ante el impacto de los cambios climáticos. *Revista Voluntad Hidráulica*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, https://www.portalces.org/sites/default/files/migrated/docs/Sobre_las_medidas_de_adaptacion_de_los_recursos_hidricos_cubanos_ante_el_impacto_del_C.C._%28Jorge_Garcia%29.pdf
- Garreaud, R.**, 2013: Warm winter storms in Central Chile. *J. of Hydrometeorology*, 14, 1515-1534.
- Garreaud, R. D.**, J.P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H.H. Sepúlveda y D. Veloso-Aguila, 2020: The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- Garrote, L.**, A. Granados y A. Iglesias, A., 2016: Strategies to reduce water stress in Euro-Mediterranean river basins. *Science of the Total Environment*, 543, 997-1009.
- Girard, C.**, J.D. Rinaudo y M. Pulido-Velazquez, 2016: Sharing the cost of a river basin adaptation portfolios to climate change: insights from social justice and cooperative game theory. *Water Resources Research*, 52(10), 7945-7962, DOI: 10.1002/2016WR018757
- Gobierno Autónomo Municipal de Turco**, 2017: Plan Territorial de Desarrollo Integral.
- Gobierno de Honduras**, *Cosechas de Agua*. Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <http://www.mcahonduras.hn/cosechas-de-agua/>
- Goerzen, R.** y W. Harder, 2017: *Experiencias con el Manejo del agua atmosférica en el Chaco*.
- Gunda, T.**, L. Benneyworth y E. Burchfield, 2015: Exploring water indices and associated parameters: a case study approach. *Water Policy*, 17: 98-111.
- Halsnæs, K.** y J. Verhagen, 2007: Development based climate change adaptation and mitigation – Conceptual issues and lessons learned in studies in developing countries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 665-684
- Hantke-Domas, M.**, 2011: *Avances Legislativos en Gestión Sostenible y Descentralizada del Agua en América Latina*. LC/W.44, Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), Santiago de Chile, Chile, 70 pp.
- Harder, W.**, A. Glatzle y W. Giesbrecht, 2012: *Reporte de visita a productores del Chaco Paraguayo*. Proyecto IDR «F3» (Flatness, Flooding and Farming), <https://ced.agro.uba.ar/gran-chaco/?q=node/62>
- Harder, W.**, 2015: Foro de Agua-INTA Sáenz Peña. Sistema de captación y almacenamiento de agua. Chaco Central, Paraguay.
- Harder, W.**, 2017: *Captación y almacenamiento de Agua de lluvia*, <http://cifca.agr.una.py/images/Documentos/Libros/Captacion%20y%20almacenamiento%20de%20agua%20de%20lluvia%20-%20Taller%20Gesiton%20del%20Agua%20-%20ECCC%20Julio%202017%20mod.pdf>
- Herrera-Pantoja, M.** y K.M. Hiscock, 2015: Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environmental Science & Policy*, 54, 81-89.
- Herwehe, L.** y C.A. Scott, 2018: Drought adaptation and development: small-scale irrigated agriculture in northeast Brazil. *Climate and Development*, 10(4), 337-346.
- Hurlbert, M.** y J. Gupta, 2017: The adaptive capacity of institutions in Canada, Argentina, and Chile to droughts and floods. *Regional environmental change*, 17(3), 865-877.
- IEA**, 2019: sitio web consultado en septiembre de 2019, <https://www.iea.org/statistics/>
- Iglesias, A.**, B. Sánchez, L. Garrote e I. López, 2017: Towards adaptation to climate change: water for rice in the coastal wetlands of Doñana, Southern Spain. *Water resources management*, 31(2), 629-653.
- Imbach, P.**, L. Molina, B. Locatelli, O. Roupsard, G. Mahé, R. Neilson, L. Corrales, M. Scholze y P. Ciais, 2012: Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2), 665-680.
- INE** (Instituto Nacional de Ecología), 2013: El Cambio Climático en México, Información por Estado y Sector, www2.ine.gob.mx/climatico/edo_sector/estados/chihuahua.html
- Instituto Nacional de Estadísticas**, 2012: Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas, <http://www.ine.gob.bo>
- Ioris, A.A.R.**, C.T. Irigaray y P. Girard, 2014: Institutional responses to climate change: opportunities and barriers for adaptation in the Pantanal and the Upper Paraguay River Basin. *Climatic change*, 127(1), 139-151.
- Jiménez, C.**, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang y S.S. Mwakalila, 2014: Freshwater resources. 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* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- Jimenez, B., I. Navarro y R. Montes, 2018:** Water quality risks associated with climate change: three Mexico City case studies. En: *Ciudades sensibles al cambio climático. Construyendo capacidades para la sustentabilidad y la resiliencia urbana con equidad*, Capítulo 3 [Delgado Ramos, G.C. (ed.)]. PINCC, UNAM. CDMX, México, pp. 398, E-ISBN: 9786073010719
- Kahil, M.T., J.D. Connor y J. Albiac, 2015:** Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe. *Ecological Economics*, 120, 226-233.
- Kahil, M., J. Albiac, A. Dinar, E. Calvo, E. Esteban, L. Avella y M. Garcia-Molla, 2016:** Improving the performance of water policies: Evidence from drought in Spain. *Water*, 8(2), 34.
- Khan, Z., P. Linares y J. García-González, 2016:** Adaptation to climate-induced regional water constraints in the Spanish energy sector: An integrated assessment. *Energy Policy*, 97, 123-135.
- Klassen, N. et ál., 2004:** *Colecta, almacenamiento, utilización y reciclaje de agua en el agua Chaco Central*, <http://chmparaguay.com.py/informaciones-ambientales/Chaco%20Paraguay/CHACO/7182C.pdf>
- Kovats, R.S., R. Valentini, L.M. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell y J.-F. Soussana, 2014:** Europe. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kumar, V., L. Del Vasto-Terrientes, A. Valls y M. Schuhmacher, 2016:** Adaptation strategies for water supply management in a drought prone Mediterranean river basin: Application of outranking method. *Science of The Total Environment*, 540, 344-357.
- Kuzdas, C., B. Warner, A. Wiek, M. Yglesias, R. Vignola y A. Ramírez-Cover, 2016:** Identifying the potential of governance regimes to aggravate or mitigate local water conflicts in regions threatened by climate change. *Local Environment*, 21(11), 1387-1408.
- La Jornada, 2012:** www.jornada.unam.mx/2012/04/17/estados/032n2est
- Landa, R., V. Magaña y C. Neri, 2012:** *Agua y Clima: Elementos Para la Adaptación al Cambio Climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México. DOI: ISBN: 9789688178874.
- Lankford, B., A. Closas, J. Dalton, E. López Gunn, T. Hess, J. Knox, S. van der Kooij, J. Lautze, D. Molden, S. Orr, J. Pittock, B. Richter, P. Riddell, C.A. Scott, J. Vos, J.P. Venot y M. Zwarteveen:** Navigating the promises, pitfalls and paradoxes of irrigation efficiency in meeting major water challenges. *Nature Sustainability*. En revisión.
- Lemos, C.C.F., A.M. Paixão, A. Morais Reis, R.S. Sakimoto y J.F. Eichstadt, 2017:** *ENFRENTAMENTO DA CRISE HÍDRICA: AS LIÇÕES APRENDIDAS NO PROCESSO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA*. Congreso.
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano y S. Vicuña, 2014:** Central and South America. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Marcos-García, P. y M. Pulido-Velazquez, 2017a:** Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería del Agua*, 21(1), 35-52.
- Marcos-García, P. y M. Pulido-Velazquez, 2017b:** Cambio climático y planificación hidrológica. En: *Libro Blanco de la Economía del Agua* [Delacámara G, J.C. Díez, F. Lombardo (ed.)]. McGraw-Hill Education, Cap. 13, 165-179. ISBN: 978-84-486-1302.
- Marcos-García, P., A. Lopez-Nicolas y M. Pulido-Velazquez, 2017:** Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305.
- Marengo, J.A., R.R. Torres y L.M. Alves 2017:** Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1189-1200.
- Marengo, J.A., C.A. Nobre, E.M. Seluchi, A. Cuartas, L.M. Alves, E.M. Mendiando, G. Obregón y G. Sampaio, 2015:** A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP-São Paulo*, 106:31-44.
- Marengo, J.A. y L.M. Alves:** Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. *Geosp – Espaço e Tempo (on-line)*, vol. 19, n.º 3, pp. 485-494, mês. 2016. ISSN: 2179-0892.
- MARM, 2008:** ORDEN ARM/2656/2008 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE, 22 de septiembre de 2008, n.º 229: 38472-38582. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador), 2017:** *Plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias*, <http://www.marn.gob.sv/plan-nacional-de-gestion-integrada-del-recurso-hidrico/>
- Martínez, A., P.F. y C. Patiño Gómez (eds.) 2010:** Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México, vol. III. *Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morales, México, 162 pp.
- Maurer, E., J. Adam y A. Wood, 2009:** Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 183-194.
- McPhee, J., E. Rubio-Alvarez, R. Meza, A. Ayala, X. Vargas y S. Vicuña, 2010:** An approach to estimating hydropower impacts of climate change from a regional perspective. En: *Watershed Management 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change* [Potter, K.W. y D.K. Frevert (eds.)]. Proceedings of the Watershed Management Conference 2010, Madison, Wisconsin, 23-27 de agosto de 2010, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA, USA, pp. 13-24.
- Meza, F.J., S. Vicuña, M. Jelinek, E. Bustos y S. Bonelli, 2014:** Assessing water demands and coverage sensitivity to climate change in the urban and rural sectors in central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5(2), 192-203.
- MiAMBIENTE, 2016:** *Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos*. Panamá, República de Panamá. Noviembre de 2016.
- MiAMBIENTE, 2017:** Informe Identificación y Priorización de Tecnologías para la Adaptación: Sector Recurso Hídrico dentro de Panamá: Evaluación de Necesidades Tecnológicas ante el Cambio Climático. Disponible en: http://database.tech-action.org/media/k2/attachments/Panama_Informe_TNA_Adaptacion_Final_25_01.2016.pdf

- MIAMBIENTE**, 2018: *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. Presentación de resultados finales, realizada por MIAMBIENTE, el PNUD y CATHALAC (documento en proceso de impresión).
- MIMAM**, 2000: *Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. ISBN: 9788483201282.
- Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRYT)**, Viceministerio de Desarrollo Rural y Agropecuario (VDRA), 2016: *Estrategia para el desarrollo sostenible en la producción de camélidos sudamericanos domésticos en Bolivia*.
- Minucci**, G., 2016: Assessing adaptive capacity of water management organizations. The case study of the municipality of Tomave (Bolivia). *Journal of Risk Research*, 19(7), 847-872.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP)**, 2017: *Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022*. Documento elaborado por la Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio de la Dirección General de Obras Públicas.
- Montenegro**, A. y R. Ragab, 2010: Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, 24(19), 2705-2723.
- Muñoz**, C.S. Avila, L.A. Jaramillo, J. Sainz, A. Martínez, Alejandro Guevara y O. Stabridis, 2006: *Agriculture Demand for Groundwater in Mexico: Impact of water right enforcement and electricity user-fee on Groundwater level and quality*, http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/decoupling_the_subsidy_for_water_pumping.pdf
- Nobre**, C., J. Marengo, M.L. Seluchi y L. Cuartas Alves, 2016: Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. *J Water Resour. Prot.*, 8:252-262, DOI: 10.4236/jwarp.2016.82022
- Nosetto**, M.D., G. Baldi, A. Wehrle, F. Murray, R. Giménez, P. Magliano, J.L. Mercau, E.G. Jobbágy, W. Harder, A. Glatzle y W. Giesbrecht, 2012: *Reporte de visita a productores del Chaco*.
- Núñez**, J., A. Vergara, C. Leyton, C. Metzkes, G. Mancilla, y D. Bettancourt, 2017: Reconciling drought vulnerability assessment using a convergent approach: Application to water security in the Elqui River Basin, North-Central Chile. *Water*, 9(8), 589.
- Obrego**, G.O., J.A. Marengo y C.A. Nobre, 2014: Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. *Climate Research*, 61(2), 93-107. DOI: 10.3354/cr01241
- Ocampo-Melgar**, A., S. Vicuña, J. Gironás, R.G. Varady y C.A. Scott, 2016: Scientists, policymakers, and stakeholders Plan for climate change: A Promising approach in Chile's Maipo Basin. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 58(5), 24-37.
- Oliveira**, F.N.M., 2011: *Climatologia de bloqueios atmosféricos no hemisfério sul: observações, simulações do clima do século XX e cenários futuros de mudanças climáticas*. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Oliveira**, F.N.M., L.M.V. Carvalho y T. Ambrizzi, 2014: A new climatology for Southern Hemisphere blockings in the winter and the combined effect of ENSO and SAM phases. *International Journal of Climatology*, 34, 1676-1692, DOI: 10.1002/joc.3795
- Oliveira** O.F., J.G.C. Gondim Filho, S.M.A. Freitas y A. Meller, 2015: *AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA ENTRE 2004 e 2014*. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília.
- Ospina Noreña**, J.E., C. Gay García, A.C. Conde y G. Sánchez Torres Esqueda, 2011: A proposal for a vulnerability index for hydroelectricity generation in the face of potential climate change in Colombia. *Atmósfera*, 24(3), 329-346.
- Otto**, F.E.L., C.A.S. Coelho, A. King, E. Coughlan de Perez, Y. Wada, G.J. van Oldenborgh, R. Haarsma, K. Haustein, P. Uhe, M. van Aalst, J.A. Aravequia, W. Almeida y H. Cullen, 2015: Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in Southeast Brazil. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 96 (12):35-40, DOI: 10.1175/BAMS-EEE_2014_ch8.1
- Paraguay**, Proyecto IDRC «F3» (Flatness, Flooding and Farming).
- Paredes-Arquiola**, J., J. Andreu-Álvarez, M. Martín-Monerris y A. Solera, 2010: Water Quantity and Quality Models Applied to the Jucar River Basin, Spain. *Water Resour Manage*, 24: 2759, <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9578-z>
- PEG**, 2014: *Plan Estratégico de Gobierno 2015-2019*. Gobierno de la República de Panamá. Sitio web consultado 10 de febrero de 2017, <http://www.mef.gob.pa/es/Documents/PEG>
- Pizarro**, R., M. Vera, R. Valdés, B. Helwig y C. Olivares, 2014: Multi-decadal variations in annual maximum peak flows in semi-arid and temperate regions of Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 300-311
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)/** Investigación para el Desarrollo (Id), 2014: *Evaluación de Vulnerabilidad e Impacto del Cambio Climático en la Región del Gran Chaco Americano*.
- Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE)**: Sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contra-la-sequia-pronacose-programas-de-medidas-preventivas-y-de-mitigacion-a-la-sequia-pmpms-para-ciudades>
- Rabatel**, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J.L. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J.-E. Sicart, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, J. Mendoza, M. Ménégoz, E. Ramirez, P. Ribstein, W. Suarez, M. Villacis y P. Wagnon, 2013: Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere Discussions*, 7, 81-102.
- Red del Pacto Global Paraguay**, 2015: *Guía de uso eficiente del agua*, <http://pactoglobal.org.py/uploads/dK39uh.pdf>
- Roco**, L., D. Poblete, F. Meza y G. Kerrigan, 2016: Farmers' options to address water scarcity in a changing climate: Case studies from two basins in Mediterranean Chile. *Environmental management*, 58(6), 958-971.
- Romero-Lankao**, P., 2010: Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Environment and Urbanization*, 22(1), 157-178.
- Romero-Lankao**, P., J.B. Smith, D.J. Davidson, N.S. Diffenbaugh, P.L. Kinney, P. Kirshen, P. Kovacs y L. Villers Ruiz, 2014: North America. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Salinas**, C.X., J. Gironás y M. Pinto, 2016: Water security as a challenge for the sustainability of La Serena-Coquimbo conurbation in northern Chile: global perspectives and adaptation. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 21(8), 1235-1246.

- Sanchis-Ibor, C.**, M. Ortega-Reig, M. García Molla, M. Pulido-Velazquez, P. Marcos-García, C. Girard, M. Ruiz-Rodríguez y A. García-Prats, 2018: *Adaptación de la agricultura a escenarios de cambio global. Aplicación de métodos participativos en la cuenca del río Júcar (España)*. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. Aceptado, pendiente de publicación.
- Santoyo-Castelazo, E.**, H. Gujba y A. Azapagic, 2011: Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36: 1488-99.
- Scott, C.A.** y T. Shah, 2004: Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: Insights from India and Mexico. *International Journal of Water Resources Development*, 20: 149-64.
- Scott, C.A.**, S.A. Pierce, M.J. Pasqualetti, A.L. Jones, B.E. Montz y J.H. Hoover, 2011: Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus. *Energy Policy*, 39: 6622-30.
- Scott, C.A.**, F.J. Meza, R.G. Varady, H. Tiessen, J. McEvoy, G.M. Garfín, M. Wilder, L.M. Farfán, N. Pineda Pablos y E. Montaña, 2013: Water Security and Adaptive Management in the Arid Americas. *Annals of the Association of American Geographers*, 103: 280-9.
- Scott, C.A.**, 2013: Electricity for groundwater use: constraints and opportunities for adaptive response to climate change. *Environmental Research Letters*, 8.
- Scott, C.A.**, S. Vicuña, I. Blanco Gutiérrez, F. Meza y C. Varela Ortega, 2014: Irrigation efficiency and water-policy implications for river-basin resilience. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4), 1339-1348.
- Scribano, R.**, C. Cabello et ál., 2017: *Valorizando el agua en un clima y economía Cambiantes en el Gran Chaco Americano. Investigación para el Desarrollo (Id)-Centro Regional para el Desarrollo a la Investigación (IDRC)*. Sitio web consultado en: <http://desarrollo.org.py/admin/app/webroot/pdf/publications/02-04-2018-14-20-37-831876183.pdf>
- Secretaría del Agua de Ecuador:** sitio web consultado el 30 de enero de 2020, <https://www.agua.gob.ec/secretaria-del-agua-y-protos-firman-convenio-de-apoyo-dirigido-a-comunidades-de-esmeraldas/>
- Secretaría Técnica de Planificaciones (STP)**, 2014, *Plan Nacional de Desarrollo 2014-2030*, <http://www.stp.gov.py/pnd/wp-content/uploads/2014/12/pnd2030.pdf>
- SENACYT**, 2015: *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá y Plan Nacional 2015-2019*. Editado y Publicado en Panamá, ISBN: 978-9962-680-15-4.
- Seoane, R.** y P. López, 2007: Assessing the effects of climate change on the hydrological regime of the Limay River basin. *GeoJournal*, 70(4), 251-256.
- Servicio de Hidrología y Meteorología**, 2018: SENAMHI. Sitio web consultado en 2018, <http://www.senamhi.gob.bo>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología**, 2016: Bases de datos Estación Meteorológica Cosapa. Bolivia.
- Seth, A.**, K. Fernandes y S.J. Camargo, 2015: Two summers of São Paulo drought: origins in the western tropical pacific. *Geophys Res Lett*, 42(24): 10816-10823, DOI: 10.1002/2015GL066314
- Shah, T.**, 2009: Climate change and groundwater: India's opportunities for mitigation and adaptation. *Environmental Research Letters*, 4: 035005.
- Sheinbaum-Pardo, C.**, B.J. Ruiz-Mendoza y V. Rodríguez-Padilla, 2012: Mexican energy policy and sustainability indicators. *Energy Policy*, 46: 278-83.
- SISS**, 2016: *Informe de Gestión del Sector Sanitario*. Disponible en: http://www.siss.gob.cl/appsiss/historico/articles-16848_recurso_1.pdf
- Solaun, K.** y E. Cerdá, 2017: The Impact of Climate Change on the Generation of Hydroelectric Power – A Case Study in Southern Spain. *Energies*, 10(9), 1343.
- Solia, M.**, O.M. Faria y R. Araújo, 2007: *Mananciais da região metropolitana de São Paulo*. São Paulo, Sabesp.
- Stahl, K.**, H. Hisdal, J. Hannaford, L.M. Tallaksen, H.A.J. van Lanen, E. Sauquet, S. Demuth, M. Fendekova y J. Jódar, 2010: Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology & Earth System Sciences*, 14, 2367-2382.
- The Nature Conservancy (TNC)**, Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA), Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco (DeSdel Chaco) y Wildlife Conservation Society Bolivia (WCS), 2005: *Evaluación Ecorregional del Gran Chaco Americano*.
- UNA&UN**, 2014: *Hidroviál Consultores. Producción de agua dulce en el Pozo Colorado, Chaco Paraguayo*, <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/36hs-ia36.pdf>
- Urrutia, R.B.**, A. Lara, R. Villalba, D.A. Christie, C. Le Quesne y A. Cuq, 2011: Multicentury tree ring reconstruction of annual streamflow for the Maule River watershed in south central Chile. *Water Resources Research*, 47(6), W06527, DOI: 10.1029/2010WR009562
- Varady, R. G.**, A.A. Zuniga-Teran, G.M. Garfín, F. Martín y S. Vicuña, 2016: Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current opinion in environmental sustainability*, 21, 70-77.
- Varela-Ortega, C.**, I. Blanco-Gutiérrez, P. Esteve, S. Bharwani, S. Fronzek, y T.E. Downing, 2016: How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 16(1), 59-70.
- Verbist K.**, M. Doria y G. Mancilla (eds.), 2018: *La Cosecha de Agua. Instrumento para la Seguridad Hídrica*. Casos de estudios del Seminario Internacional, 9-10 de marzo de 2017, Santiago, Chile. UNESCO Programa Hidrológica Internacional, París.
- Vicuña, S.**, R.D. Garreaud y J. McPhee, 2011: Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105(3-4), 469-488.
- Vicuña, S.**, J. McPhee y R.D. Garreaud, 2012: Agriculture vulnerability to climate change in a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 431-441.
- Vicuña, S.**, J. Gironás, F.J. Meza, M.L. Cruzat, M. Jelinek, E. Bustos, D. Poblete y N. Bambach, 2013: Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 58(8), 1598-1619.
- Vicuna, S.**, P. Alvarez, O. Melo, L. Dale y F. Meza, 2014: Irrigation infrastructure development in the Limarí Basin in Central Chile: implications for adaptation to climate variability and climate change. *Water international*, 39(5), 620-634.
- Vicuña, S.**, M. Gil, O. Melo, G. Donoso y P. Merino, 2018: Water option contracts for climate change adaptation in Santiago, Chile. *Water international*, 43(2), 237-256.
- Vuille, M. et ál.**, 2018: *Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes. Impacts, uncertainties and challenges ahead*.
- Vuille, M.**, M. Carey, C. Huggel, W. Buytaert, A. Rabatel, D. Jacobsen, A. Soruco, M. Villacis, C. Yarleque, O.E. Timm, T. Condom, N. Salzmann y J.E. Sicart, 2018: *Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes–Impacts, uncertainties and challenges ahead*. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213.