

PLAN GENERAL MAESTRO ESTRATÉGICO DE INVESTIGACIÓN



CUIDEMOS Y VALOREMOS
EL AGUA QUE MUEVE A MÉXICO

www.semarnat.gob.mx
www.conagua.gob.mx

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA



SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PLAN GENERAL MAESTRO ESTRATÉGICO DE INVESTIGACIÓN

Comisión Nacional del Agua

Plan General Maestro Estratégico de Investigación

D. R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña,
C. P. 14210, Tlalpan, México, D. F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000

Subdirección General Técnica

Impreso y hecho en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.
Queda prohibido el uso para fines distintos al desarrollo social.
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

CONTENIDO

Resumen ejecutivo.....	5
1. Antecedentes	6
2. La investigación de la sequía.....	8
3. Los arreglos interinstitucionales para un Programa de Investigación en Sequía	11
4. Investigación sobre sequía meteorológica.....	13
5. Investigación sobre sequía hidrológica	15
6. La sequía agrícola	18
7. La sequía socioeconómica.....	21
8. Las lecciones aprendidas.....	22
9. La comunicación sobre sequía	24
10. Las acciones del corto plazo	25
11. Conclusiones.....	26
12. Referencias.....	27

RESUMEN EJECUTIVO

El interés en realizar una gestión eficiente del riesgo ante sequía ha llevado a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a plantearse el diseño de un Plan Estratégico Maestro de Investigación sobre la sequía. El presente documento presenta los elementos, actores clave y materia de investigación que puede resultar en conocimiento para fortalecer las acciones del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE). El planteamiento se basa en desarrollos similares que vienen generándose en diversas partes del mundo donde la prevención de los impactos negativos o la mitigación son prioritarios para reducir los costos que un fenómeno climático como la sequía tiene.

En primer lugar se propone trabajar con cuatro tipos de sequías: la meteorológica, la hidrológica, la agrícola y la socioeconómica, para distinguir aquella que es completamente natural (la meteorológica), de las que pueden resultar por una ineficiente gestión de los recursos, como la hidrológica, la agrícola y la socioeconómica. En cada caso, se propone considerar elementos de investigación que lleven a mejores estrategias de monitoreo, de entendimiento de procesos y de pronóstico, considerando que algunas sequías pueden tener un menor impacto si se trabaja en un marco de gestión riesgo que haga una realidad la prevención. En el caso de las sequías hidrológica, agrícola y socioeconómica, se plantea adicionalmente diseñar esquemas de acción para el PRONACOSE en su forma de Planes de Medidas de Prevención y Mitigación de la Sequía (PMPMS), para cada una de las regiones hidrológico administrativas. Dos líneas de investigación adicionales son las relacionadas con la generación de capacidades (for-

mación de recursos humanos) y la comunicación de la información sobre sequía. La primera no se limita a formación de nuevos especialistas en el tema, sino que incluye el fortalecer y actualizar el conocimiento de los profesionales que laboran en diversas dependencias y que se constituyen como actores clave. La segunda plantea la necesidad de definir una estrategia para informar sobre la ocurrencia de la sequía que motive a ejecutar las acciones de prevención contempladas en los PMPMS.

Para la construcción del Plan Estratégico Maestro de Investigación, se establece la necesidad de incorporar a diversas secretarías del Gobierno Mexicano, encargadas de sectores específicos como son SAGARPA, SEMARNAT, SEDESOL, SEGOB, por mencionar algunas. Se plantea que el financiamiento para los proyectos de investigación provenga de los fondos sectoriales de CONACYT con cada una de las secretarías de estado. En cada caso, se estructura una propuesta de las demandas específicas que podrían tener los llamados Fondos Sectoriales. Adicionalmente, se sugiere establecer convenios con instituciones científicas internacionales interesadas en el tema de la sequía.

Con la puesta en marcha del Plan Estratégico Maestro de Investigación se contará con información científica que en un lapso de uno a dos años proporcione respuestas a algunas de las interrogantes que existen sobre esta condición climática y sus impactos, de tal forma que un mejor conocimiento en el tema ayude a adecuar los planteamientos establecidos en los PMPMS en los diversos organismos de cuenca del país.

1. ANTECEDENTES

Dado que las actividades humanas y la salud de los ecosistemas dependen de fuentes adecuadas y confiables de agua, las sequías representan un peligro para la sociedad y el medio ambiente. A pesar de la importancia que la sequía tiene para México, son pocos los estudios dirigidos a entender sus aspectos meteorológicos, económicos, sociales y ambientales. La mayoría de los estudios en el tema sólo describen las condiciones anómalas en la precipitación y otros parámetros climáticos o hidrológicos, pero muy pocos las causas y los procesos. La sequía es uno de los temas de investigación ambiental de mayor importancia en el mundo, principalmente en los países desarrollados con zonas áridas (Mariotti *et al* 2013). Los programas de investigación sobre la sequía son internacionales, multidisciplinarios, transversales y con una fuerte componente de aplicaciones sobre usos de información por sectores (eg., uso de información climática).

Tener la capacidad para monitorear las sequías en tiempo (casi) real y contar con predicciones de esta manifestación de la variabilidad climática en plazos de semanas a estaciones puede reducir la severidad de los daños sociales y económicos si se usa la información sobre el tema, como es el objetivo de los Programas de Medidas Preventivas y de Manejo de la Sequía (PMPMS). El interés en entender, preparar información y predecir la sequía es casi mundial, y en muchas partes se cuenta con planes de acción apoyados en estrategias de investigación, que incluyen no sólo los aspectos climáticos, sino también los hidrológicos, agrícolas y sociales sobre la sequía, de forma que se cuenta con arreglos interinstitucional para una mejor gestión de dicho peligro climático.

El Gobierno Mexicano también ha expresado su interés en contar con estrategias de reducción de riesgo ante la sequía. Esto ha quedado de manifiesto en la creación del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), que tiene por objeto diseñar estrategias de acción preventiva que disminuyan los costos sociales, económicos y ambientales de la sequía. Y como ha sucedido en muchos de los países con programas de gestión de riesgo ante la sequía, se trabaja en un Programa de Investigación sobre la Sequía que encuentre respuestas a algunas de las interrogantes sobre el tema y a las necesidades de información de diversos sectores y regiones del país. La estrategia de investigación forma parte de un plan generalizado en entender los procesos atmosféricos de impacto en

México. Aunque se han logrado avances en el entendimiento de la sequía, aun no se ha logrado construir esquemas que permitan definir medidas de prevención de los efectos negativos de la sequía, principalmente porque el reto forma parte de una situación de crisis en materia de gestión hídrica. Es por ello que el programa de investigación científica que aquí se plantea, debe ser parte de un planteamiento mucho más amplio en materia de gestión del agua.

Los esfuerzos de la comunidad científica internacional han dado lugar a una mejor comprensión de las sequías en el mundo y a mejoras de las herramientas de monitoreo y predicción de este fenómeno (Sheffield, *et al* 2012). Hoy se entienden de mejor forma los procesos que llevaron a algunas de las sequías más severas del siglo XX, incluyendo la ocurrida en 1930 y que se conoce como la sequía del *Dust Bowl* en Norteamérica. En décadas recientes se han desarrollado herramientas y bases de datos que mejoran el funcionamiento de los sistemas de vigilancia climática, como el Monitor de Sequía de Norte América, que se basa en diferentes esquemas de asimilación de datos y de teledetección para caracterizar la incidencia y severidad del déficit de precipitación y sus múltiples manifestaciones. Además, se cuenta con nuevos esquemas para la predicción de la sequía, y en el caso de algunos países desarrollados, se cuenta con centros nacionales de predicción del clima de condiciones climáticas extremas como la sequía (e.g., *International Research Institute for Climate and Society*). En conjunto con enfoques de predicción hidrológica, los modelos climáticos constituyen hoy una herramienta esencial para la planeación en el manejo del agua. Sin embargo, se reconoce que el estudio de la sequía no puede limitarse a sus aspectos climáticos o hidrológicos sino que se requiere analizar el proceso o contexto que lleva a que el déficit de lluvia se convierta en sequía hidrológica, agrícola o incluso social. Es por ello, que el tema sequía debe analizarse de forma transversal y multidisciplinaria, de manera que lleve a plantear acciones de reducción del riesgo de desastre.

A pesar de estos los avances en materia de entendimiento de la sequía, las capacidades actuales de monitoreo y de predicción no están a la altura de las necesidades de los usuarios, en especial en lo que se refiere a pronósticos de buena calidad a escala regional para la toma de decisiones (Quan *et al* 2012). Para hacer frente a este reto excepcional, se necesitan es-

fuerzos coordinados dentro del amplio espectro de la investigación sobre sequía, que son necesarios considerar para tener avances científicos relevantes que respondan a las necesidades de los usuarios. Se requiere atacar diversos problemas, desde los dirigidos a la comprensión básica de los mecanismos físicos y dinámicos de la sequía, hasta los destinados a poner a prueba nuevas herramientas de vigilancia de la sequía y de predicción con fines operativos y de servicio.

El objetivo del presente trabajo es: elaborar un plan general maestro estratégico de investigación en temas vinculados con la atención (prevención y mitigación) de la sequía en México, como apoyo al desarrollo e implementación del PRONACOSE. El Plan estará integrado por líneas de investigación propuestas por las instituciones responsables de sectores y regiones afectados por este fenómeno, y analizadas por especialistas en el tema.

2. LA INVESTIGACIÓN DE LA SEQUÍA

La ciencia de la sequía en el mundo

Las sequías son una de las principales amenazas climáticas en el mundo. Sus impactos van desde reducciones en el suministro de agua, hasta la inanición y la muerte. La sequía ha afectado civilizaciones antiguas hasta la catástrofe con hambrunas, la pérdida de vidas y bienes. Algunos sugieren que la actividad y extensión de las sequías en el mundo va en aumento (Dai *et al.*, 2004). Pero otros plantean que los cambios no son significativos (Sheffield and Wood 2008; Seneviratne 2012). En todo caso, es claro que los impactos de la sequía pueden reducirse si hay advertencias. Esto puede ser en escalas relativamente cortas para las condiciones de una sequía intraestacional o interestacional, o largas como la de sequías de varios años. En países como Estado Unidos, Australia y Sudáfrica, se han desarrollado políticas nacionales de sequía para reducir sus impactos negativos (e.g., Wilhite *et al* 2014). La mayoría de ellas se centran en las intervenciones posteriores al impacto proporcionando asistencia económica a los afectados. También hay programas preventivos, destinados a reducir la vulnerabilidad, que incluyen el establecimiento de sistemas integrales de alerta temprana a partir de la mejora de las predicciones estacionales y la conciencia del riesgo sobre la sequía (Steinemann, 2006). Con los recientes avances en la comprensión de la variabilidad del clima (Schubert *et al* 2009) es posible prepararse ante los potenciales impactos de la sequía. Con frecuencia, las respuestas a la sequía se han orientado a optimizar el uso de agua en los hogares, la agricultura, la ganadería y la industria, y en aumentar el almacenamiento de agua y la infraestructura de distribución (UNISDR, 2007).

En México, las sequías meteorológicas han afectado gravemente a los sectores socioeconómicos y el medio ambiente, sobre todo en la parte centro-norte del país (García-Acosta, 2003; Magaña y Neri, 2012). Las condiciones áridas y semiáridas dominantes en estas regiones de México dan lugar a pérdidas significativas en las actividades agrícolas y ganaderas

bajo sequías prolongadas. En el mundo, los impactos de la sequía incluyen la migración y el abandono de las actividades agrícolas de subsistencia (Lee., 2014). Las sequías a corto plazo, como las asociadas con El Niño, tienen consecuencias negativas principalmente en la agricultura de temporal o el sector forestal (Delgadillo *et al.*, 1999). Las sequías meteorológicas e hidrológicas prolongadas, como la ocurrida entre 2000 y 2002, generaron dificultades en el cumplimiento de los tratados de agua binacionales entre México y Estados Unidos (Sánchez, 2006). La sequía de América del Norte ocurrida entre 2010 y 2012 se considera de las más graves, con impactos contrastantes tanto en México como en los Estados Unidos (Combs, 2014).

Numerosos estudios sobre la sequía se centran en la caracterización del fenómeno y van desde las estimaciones de su distribución mundial hasta estudios detallados de los eventos localizados. Otros buscan comprender mejor los factores de pequeña y gran escala que conducen al inicio, mantenimiento y término de la sequía. Otros más en encontrar formas de mitigar el impacto de esta anomalía climática. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, los costos económicos, ambientales y sociales de la sequía siguen siendo enormes, por lo que muchos plantean la necesidad de un programa de investigación sobre sequía coordinado e integrado a nivel mundial. Un esfuerzo en esta dirección es el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), el cual tiene una red de investigadores de todo el mundo con experiencia en diversos aspectos de la sequía.

La identificación de las posibles acciones a ejecutar durante la sequía y la necesidad de apoyar a los tomadores de decisiones son retos importantes. Un conjunto de criterios que sirvan para transitar de la generación de pronósticos climáticos a su aplicación práctica se puede enmarcar en cuatro ejes principales: 1) la necesidad de desarrollar las previsiones de sequía e información que sea relevante para los tomadores de decisiones; 2) la necesidad de un compromiso significativo y permanente entre los proveedores de información de la sequía y los usuarios de esa información; 3) la comunicación efectiva de información sobre la sequía, y 4) los resultados

comprobables que muestren utilidad (o al menos la utilidad potencial) de la información relacionada con sequía en el proceso de toma de decisiones (Nicholls et al 2005; National Research Council 2009).

Desde la perspectiva del usuario, la información relevante para la gestión de la sequía depende en última instancia de lo que está siendo administrado. En la disponibilidad de agua por ejemplo, el elemento clave puede ser el caudal. En tal caso, las predicciones de esa variable hidrológica específica son mucho más relevantes que, por ejemplo, las predicciones de la precipitación estacional, un índice de sequía hidrometeorológica, o el balance de agua en el suelo. En muchos casos, las previsiones de las variables más relevantes no están contempladas en la información climática. Es por ello necesario llevar a cabo investigaciones con el fin de cuantificar la relación entre el factor de predicción disponibles (por ejemplo, la precipitación estacional, nuevos índices meteorológicos de “sequía” que van más allá de los índices basados en la precipitación simples) y el predictando de interés (caudales, situación de los cultivos, etc.) para analizar si las predicciones (o incluso las condiciones monitorizadas) deben ser incorporados en la toma de decisiones (Lyon et al. 2009).

La cuestión de la escala de tiempo es otra consideración importante. Como la sequía es generalmente vista como un fenómeno lento, puede parecer que la escala de tiempo más relevante para la predicción de sequía es estacional (o más). Sin embargo, particularmente en el sector de la agricultura, la información meteorológica a escala de tiempo más corto (semanas) es también muy relevante. Esto va desde la precipitación a mediano plazo de tiempo meteorológico a las perspectivas subestacionales del balance hídrico. En otros casos, los usuarios están interesados en los cambios previstos en las estadísticas de tiempo diario dentro de una temporada, como la duración o frecuencia de los días sin lluvia. Si un modelo de cultivo se utiliza para predecir los rendimientos, a menudo es necesario desagregar la información de pronóstico estacional (de precipitación y temperatura) en cambios en las características estadísticas de tiempo diario ya que estos últimos son los insumos necesarios en el modelo de cultivo (e.g., Hansen et al., 2006). Los modelos hidrológicos también requieren insumos a estas escalas de tiempo más cortos. En algunas regiones, la previsibilidad de la frecuencia de las precipitaciones es más importante que el pronóstico de la cantidad estacional. Esto es de interés para los profesionales de la agricultura de temporal, así como lo es la predicción del inicio de la temporada de lluvias (Morón et al 2009).

Naturalmente, existen múltiples demandas de información sobre la sequía en escalas de tiempo más largo de lo estacional o interanual. Estas incluyen las

variaciones de sequía en escalas de tiempo de décadas y por supuesto, los posibles impactos del cambio climático. Sobre la base de las observaciones históricas y datos climáticos proxy (como dendrocronologías), existe una gran cantidad de documentación de eventos de sequía que se han producido en décadas (Villanueva Díaz et al 2014). Dicha información puede ser de gran utilidad práctica para los tomadores de decisiones (los gestores del agua, el sector energético, los planificadores de infraestructura, etc.) siempre que se exprese en términos de interés para el sector específico considerado (Prairie et al., 2008; Rajagolpolan et al. 2009).

La mayoría de las decisiones sensibles a la sequía se hacen para ubicaciones geográficas específicas y por lo tanto la información de sequía debe ser puesta con una resolución espacial relevante. Por supuesto, en la práctica, la resolución espacial de la información deseada por los tomadores de decisiones puede no coincidir con el que se puede proporcionar de forma confiable. Esto se aplica a la cartografía de las condiciones de sequía observadas, así como a las previsiones (Dow et al. 2008). Los modelos climáticos utilizados para la predicción climática anual suelen estar en resolución bastante gruesa (en relación a las escalas espaciales características de las variaciones locales en la cobertura del suelo, la topografía, el microclima, etc.). Sin embargo, el resultado de la reducción de escala es que la alta resolución espacial de la sequía no equivale necesariamente a información confiable. Y en algunos casos puede no ser necesaria una alta resolución espacial. Por ejemplo, hay varios estudios que documentan el uso exitoso de la información global de modelos climáticos para predecir directamente el caudal (por ejemplo, Brown et al 2009; Landman et al., 2001). Este enfoque evita el problema de la reducción de escala espacial de un modelo climático global y la integración de los resultados de más de una cuenca hidrográfica.

Además de ser relevante, la información sobre sequía debe ser creíble, para que los usuarios puedan actuar en consecuencia (National Research Council 2009; Mitchell et al 2006). Los generadores de información de la sequía deben documentar claramente la habilidad de sus modelos si esperan que las predicciones sean incorporados en la toma de decisiones (Hartmann et al. 2002). Sin embargo, la toma de decisiones en materia de sequía requiere algo más que la entrega de pronósticos o monitoreo sobre el clima. Es esencial que los propios responsables de las decisiones jueguen un papel en el desarrollo de los productos. Por ejemplo, los pronósticos de precipitación cuidadosamente validados para una cuenca en particular podrían no servir si el administrador local del agua no puede incorporar esa información en su proceso de toma de decisiones. En otras palabras,

para ser realmente eficaz, la información debe ser transferida a los usuarios a través de un proceso de apoyo a las decisiones, no sólo como datos de la sequía (*National Research Council 2009*). Esto requiere un compromiso continuo entre los proveedores de información climática y los usuarios potenciales de su información.

Es necesario que la información sobre sequía disponible proporcione algún beneficio tangible para los tomadores de decisiones, o por lo menos un beneficio potencial. Tal evidencia puede ser en forma de un estudio de caso relevante para un sector y región particular, como las predicciones estacionales de caudal y la gestión del agua en el noreste de Brasil (*Broad et al., 2007*) o el norte de Filipinas (*Brown et al. 2009*). Esta ha sido un área emergente de investigación en los últimos años en el ámbito de las predicciones estacionales a interanuales (*Meza et al. 2008*). Para el proveedor de información y para los usuarios puede ser relevante analizar las lecciones aprendidas de los esfuerzos anteriores o en curso (*Lemos et al. 2002*).

Para estimar el déficit de precipitación, se usa comúnmente el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). El SPI se basa sólo en la precipitación (*Hayes et al. 1999, McKee et al. 1995*). El SPI fue desarrollado para categorizar precipitaciones como una desviación con respecto a una función normalizada de distribución de probabilidad de la precipitación. Las categorías van desde menos de -3 (muy seco) a +3, (extremadamente húmedo). La ventaja que ofrece este índice, es que cubre diferentes escalas de tiempo y se puede aplicar a los datos de precipitación de una estación. Otro índice comúnmente utilizado es el PDSI, que se basa en el equilibrio del agua entre la oferta y la demanda de humedad del suelo (*Palmer 1965*). Las categorías van desde menos de -4 (sequía extrema) a más de 4 (condiciones de lluvia extrema), y se han normalizado para facilitar la comparación de región a región. Sin embargo, hay muchas deficiencias en el PDSI (*Mo y Chelliah 2006; Karl 1986; Kunkel et al., 2008*). Índices más recientes incluyen aquellos basados en la evapotranspiración (ET), derivados de satélite o de un sistema de asimilación de datos. La ET se puede utilizar para medir el desarrollo sequía y está estrechamente relacionado con la cobertura vegetal.

Además del déficit de precipitaciones, la reducción del caudal de los ríos, y el déficit de humedad del suelo también contribuyen a las pérdidas económicas y agrícolas asociadas a la sequía. Como las observaciones a largo plazo de la escorrentía y la humedad del suelo son escasas, los conjuntos de datos producidos por modelos con asimilación de datos se convierten en alternativas valiosas de información. El índice de humedad del suelo y la escorrentía se basa en el modelo derivado de la humedad del suelo y la escorrentía como indicadores de sequía.

La investigación en México

Son diversos los estudios sobre sequía realizados en México. La mayoría documentan los episodios de déficit de precipitación a nivel regional (*Márdero, et al 2012; Magaña, 1999; Méndez y Magaña, 2010; Escalante-Sandoval y Reyes-S 2012, Hernández Cerda et al 2004; Vilches-Frances, 2014*). La sequía agrícola es principalmente analizada en términos de los impactos que ésta tiene (*Bellon et al 2004*), de las opciones y desarrollos para enfrentar la sequía (*Acosta, et al., 1999*), así como de los impactos en agroecosistemas (*Arreola Ortiz, 2010; Reynolds et al 1999*). En cada caso será necesario desarrollar estudios para entender los procesos relacionados con el cómo afectan las sequías distintos tipos de ecosistemas, acoplando la información climática a la respuesta de los éstos.

Son numerosos también los estudios que documentan la historia de la sequía y sus impactos, utilizando aproximaciones basadas en *proxis*, como en dendrocronología (*Villanueva Díaz, et al 2014*), o en recuentos históricos (*García Acosta, 2003; Garza Merodio, 2002*), los cuales son referencia necesaria para análisis de procesos e impactos, o para diagnósticos de vulnerabilidad como elemento multifactorial y dinámico. Finalmente, en materia de sequía hidrológica, la literatura en México es abundante, con referencia esencialmente de los problemas asociados al manejo del agua bajo condiciones de estrés hídrico y déficit de precipitación (*Mendoza et al 2005; Pereyra y Sánchez, 1995; Ortega-Gaucin, 2012*)

3. LOS ARREGLOS INTERINSTITUCIONALES PARA UN PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN SEQUÍA

El entendimiento de la sequía, desde los factores físicos que la producen, hasta las causas por las que deriva en desastre de grandes dimensiones en diversos sectores y regiones requiere pensar en las diversas manifestaciones del fenómeno diferenciando entre:

- Sequía meteorológica,
- Sequía hidrológica,
- Sequía agrícola,
- Sequía socioeconómica, así como en aspectos sobre
- Cultura de la sequía (difusión del riesgo ante sequía) en la sociedad y autoridades y
- Esquemas de comunicación de la información, que lleven a un conocimiento y toma de decisiones, dentro de un marco de rendición de cuentas. En México, son diversas las instancias en donde el tema sequía debe ser considerado como parte de las políticas públicas de la administración federal, estatal y municipal. Las instituciones y sectores involucrados son reflejo de la transversalidad que el tema tiene en cualquier parte del mundo.

a) Las instituciones

Los impactos de la sequía en el mundo son motivo de noticia para la comunidad científica y para los administradores del agua, y en ese sentido es que el tema ha sido tratado por mucho tiempo de forma conjunta entre hidrólogos, climatólogos y administradores del agua, específicamente, entre especialistas de la CONAGUA y científicos de diversas instituciones académicas y centros de investigación. Sin embargo, el trabajo requiere de otro tipo de especialistas que analicen aspectos poco estudiados hasta ahora sobre la sequía y sus impactos (eg, costos, riesgo). Lo anterior implica que desde el Gobierno Mexicano se requiere contar con la participación de otros sectores y secretarías

como son: SEMARNAT, SAGARPA, SALUD, SEGOB, SEP, SECTUR, SHCP, SRE, SENER, SEDESOL, Economía y sus organismos dependientes, además de entidades paraestatales y organizaciones de la sociedad civil.

Las necesidades de investigación en materia de sequía pueden ser atendidas de forma conjunta por gobierno y sociedad, pero los temas deben ser trabajados prioritariamente por las entidades oficiales que traten con un aspecto particular del tema. Por ejemplo, los aspectos meteorológicos e hidrológicos serán en mayor medida responsabilidad de la CONAGUA; los aspectos relacionados con sequía agrícola deberán tener un seguimiento especial por parte de la SAGARPA, y la sequía socioeconómica por parte de SEDESOL, Economía y la SEGOB, esta última, vigilando los aspectos de la protección civil y migraciones. Cada una de las Instituciones de Gobierno cuenta con fondos sectoriales CONACYT al igual que las entidades del país (con fondos mixtos CONACYT), que se podrán aprovechar para financiar las propuestas aquí planteadas o sugerir las propias, pero intentando siempre mantener una adecuada coordinación con la Comisión Intersecretarial que atiende la sequía.

De igual manera, se sugiere que la agenda o programa de investigación sobre sequía sea consultado con científicos y líderes nacionales dedicados al estudio de este fenómeno y sus impactos, de forma que en el corto plazo se puedan formular un primer listado de proyectos y se cuente con los primeros resultados que apoyen las acciones encaminadas a reducir el riesgo frente a la sequía. Es claro que se trata de un proceso de construcción de conocimiento con un fin específico que tomará algunos años en rendir los frutos que se esperan, principalmente entre los usuarios de la información sobre clima, pero que debe iniciarse, pues la política oficial pone al agua como un elemento de seguridad nacional.

b) El financiamiento

Son diversas las posibilidades de financiar la investigación en materia de sequía, pero la mayoría se encuentra en los apoyos que otorga CONACYT para la investigación y el desarrollo. En este sentido se pueden considerar diversos mecanismos de los Fondos CONACYT. En primer lugar se tienen los Fondos Sectoriales, en donde participan instituciones del Sector Público en conjunto con CONACYT para financiar demandas específicas de investigación. Así, se pueden pensar en dividir la agenda de investigación de acuerdo a los intereses de cada secretaría con especial énfasis en:

Sequía Meteorológica: CONAGUA, SMN

Sequía Hidrológica: CONAGUA, SEMARNAT, CONAZA

Sequía Agrícola: SAGARPA, CONAGUA, Conafor, CONAZA

Sequía Socioeconómica: SEDESOL, SE, SRE, SEGOB, CENAPRED

Comunicación de la Información sobre Sequía: CONAGUA; SEP

Cada uno de los sectores podrá hacer una o más demandas específicas para definir los aspectos de monitoreo, entendimiento de procesos, pronósticos y gestión de riesgos.

Por otro lado, se pueden generar demandas específicas usando financiamiento de los Fondos Mixtos CONACYT, los cuales tienen un objetivo particular de apoyar generación de conocimiento para los estados. En esta línea de apoyo a la investigación para la sequía se pueden considerar incluso apoyos de los programas regionales del tipo Fordecyt en donde las regiones puedan plantear esquemas de investigación entre diversas instituciones de la región.

Una opción adicional al trabajo en grupo son los Fondos para la investigación en un tema particular abordado por diversas instituciones de investigación. Se puede constituir un Fondo CONACYT para la investigación en el tema de la Sequía y su gestión de riesgo, considerando grupos de investigadores de diversas instituciones académicas.

Se debe solicitar además, el apoyo de CONACYT para gestionar fondos para la investigación con su contraparte de los Estados Unidos, la Fundación Nacional para la Ciencia (*National Science Foundation*), para financiar trabajos conjuntos de interés en el tema de la sequía para México y Estados Unidos, en temas relacionados a variabilidad climática y aguas transfronterizas. Es

necesario plantear una participación más activa de científicos mexicanos en los proyectos Clivar relacionados con la sequía.

c) La formación de especialistas en el tema de sequía

Un elemento esencial en cualquier programa de investigación es la participación de estudiantes que eventualmente se conviertan en los especialistas en sequía. Su participación en programas de posgrado y publicación de artículos debe ser parte esencial de las propuestas. Los fondos para proyectos deben contemplar una fuerte componente de formación de recursos humanos especializados en investigación y desarrollo, que refuercen las entidades de gobierno y los sectores económicos relacionados con el sector agua.

Cada institución apoyada con fondos de investigación deberá procurar un programa de estudios de posgrado (ciencias atmosféricas, hidrología, ciencias ambientales, etc.) en donde se pueda obtener un posgrado con desarrollo de investigación.

Una oportunidad única está en la creación de nuevos programas de posgrado en el campo de la meteorología y la climatología con una especialización en aspectos de agua o de gestión riesgo, como puede ser el relacionado con la sequía. Un incremento de la oferta para recién graduados de las carreras de las ciencias de la atmósfera, la hidrología o la geofísica en general, siempre es adecuada dada la necesidad de especialistas en diversas partes del país.

Adicionalmente, se buscarán esquemas para la actualización de conocimientos entre los actores clave, como los administradores del agua, los extensionistas agrícolas, los economistas ambientales en el gobierno, los diseñadores de políticas públicas, de forma que puedan aprovechar de mejor forma los desarrollos de investigación obtenidos. Este tema es de particular relevancia para el personal de la CONAGUA y de SAGARPA. Quienes participarán indirectamente en los proyectos de investigación para apropiarse de los desarrollos. Los consejos de cuenca y autoridades estatales serán partícipes de los proyectos cuando se trabaje con aspectos relacionados con el manejo del agua.

4. INVESTIGACIÓN SOBRE SEQUÍA METEOROLÓGICA

El tema de la sequía ha sido trabajado históricamente desde diversas perspectivas de las ciencias naturales y sociales. En México, muchos de los estudios han documentado los impactos de este fenómeno, y en menor medida han analizado las causas que generan sequía meteorológica, agrícola o socioeconómica, en un contexto de riesgo, que permita proponer estrategias de gestión, necesarias en diversos sectores. Es en este sentido que se debe analizar la condición de peligro y la aparición de la amenaza de la sequía, así como la relacionada con la vulnerabilidad, factor que convierte a este fenómeno natural en sequía agrícola, hidrológica o socioeconómica.

El término severidad de la sequía tiene connotaciones diferentes en la literatura científica, tales como la sequía hidrológica, donde se define como la escasez o la suma acumulada de déficit de agua con referencia a un nivel pre-especificado. En la sequía meteorológica, la gravedad se ha definido en forma de índices como el índice de Palmer o el de severidad de la sequía. Existe una variedad de técnicas y métodos para analizar la duración y severidad de las sequías meteorológicas e hidrológicas pero éstas deben mostrar coherencia, en donde se analicen los procesos en que una lleva a otra. Por otro lado, las sequías agrícolas se analizan con base en los conceptos de humedad del suelo con las consideraciones de rendimiento de los cultivos y el uso de múltiples técnicas de regresión lineal, por ejemplo. Los aspectos de predicción de la duración sequía se han desarrollado mejor que los aspectos relacionados a la predicción de su severidad. Estos últimos deben ser mejorados ya que la información sobre la severidad de la sequía es de importancia práctica y forma parte esencial del proceso de diseño de la infraestructura de almacenamiento de agua para dar respuesta a las sequías. Un reto importante de la investigación de la sequía es desarrollar métodos y técnicas adecuadas para pronosticar el inicio y terminación de los periodos de sequía y las regiones afectadas. Una tarea igualmente difícil es la difusión de los resultados de investigación de la sequía para el uso práctico y aplicaciones más amplias.

En materia de información climática y de caracterización de la sequía meteorológica, las líneas de investigación van a través de tres ejes principales:

- i) **Entendimiento del fenómeno**, reconociendo que la sequía es un fenómeno natural que presenta diversas características espaciales y temporales y cuyos orígenes (forzantes que la generan y modulan como la temperatura de superficie del mar o la humedad del suelo) son de diversa índole (Méndez y Magaña, 2010, Seager *et al* 2014). Así, se pueden analizar factores de escala global o local que alteran el ciclo hidrológico, o duración de eventos de sequía, pasando de condiciones con duración de semanas, a eventos con duración de varios años. En el caso de México adicionalmente, la caracterización física de la sequía debe tomar en cuenta su significado en zonas tropicales con precipitación importante (más de 1000 mm/año) o en regiones áridas y semiáridas (menos de 500 mm/año). Un mejor entendimiento de los procesos de la sequía, permitirá definir mejores estrategias de monitoreo y mejorar las herramientas de su predicción.
- ii) **Monitoreo**, considerando los desarrollos de sistemas de asimilación de datos, no sólo meteorológicos, sino ambientales en general, que incluyen condiciones en el suelo, los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y las condiciones ambientales de vegetación que pueden considerarse anómalas y que resultan un peligro. La vigilancia de las condiciones de sequía deben avanzar aprovechando la teledetección y la información que genera, mucha de la cual está hoy disponible, y es reflejo de la puesta en funcionamiento de nuevos sistemas de satélite (eg, Modis) (e.g., Thenkabail *et al* 2004). A través de diversos algoritmos las mediciones in situ y las estimaciones remotas de condiciones de precipitación, temperatura, agua continental o condición de agroecosistemas resulta en información de gran detalle espacial para caracterizar y dar seguimiento a la sequía. El desarrollo de indicadores de sequía más significativos para la planeación de una actividad en riesgo ante la sequía, es parte de las necesidades en materia de monitoreo climático (eg, PRONACOSE).

iii) La **predicción de la sequía**, en sus diversas escalas espacio temporales es sin duda uno de los aspectos de investigación en materia de sequía en donde se debe avanzar de forma importante, para eliminar viejos paradigmas que plantean “la impredecibilidad” de ésta y otras condiciones climáticas. La sequía es predecible, pero es necesario establecer en qué medida, bajo qué condiciones, con qué detalle, y a qué plazo, para así establecer cómo utilizar la información de pronóstico, y en qué aspectos de la predicción se debe trabajar. Si bien se cuenta con esquemas empírico-estadísticos de predicción climática estacional, el uso de modelos del clima es la herramienta de trabajo de los grupos científicos más avanzados en el tema de sequía, trabajando en experimentos de ensambles multi-modelo. Reconociendo que la capacidad en México en desarrollo y uso de modelos del clima es limitada, estos aspectos de desarrollo tendrán que construirse a partir de colaboraciones científicas internacionales. Finalmente, un reto en materia de sequía es analizar en qué medida un evento extremo, como un ciclón tropical entrando a tierra puede cambiar en el curso de unos días, la disponibilidad de agua en presas y embalses. La mayor actividad de ciclones tropicales en periodos de sequía en el norte del país debe ser contemplada cuando se piense en medidas estructurales de reducción de vulnerabilidad.

Con base en los desarrollos anteriores es de esperarse que se cuente con:

- Mejoras de la precisión en el seguimiento de las condiciones de sequía en curso
- Mayores detalles para identificar el inicio, la intensidad, la duración, la extensión y el término de un episodio de sequía

- Mayor capacidad para aprovechar los avances en materia de percepción remota con el fin de caracterizar la sequía y algunos de sus impactos
- Capacidad para desarrollar índices de seguimiento de la sequía meteorológica de mayor significado para los tomadores de decisiones
- Capacidad para caracterizar el peligro climático que representa una sequía meteorológica
- Un mejor entendimiento de las causas de la sequía (forzantes climáticos y procesos)
- Una mejor descripción de la evolución de la sequía a escala regional en relación con el tipo de clima dominante
- Mejores capacidades para describir la variabilidad climática
- Mejores predicciones para prepararse para el desarrollo de las condiciones de sequía

Finalmente, se contará con:

- Mejores elementos para pronosticar el clima en escalas intra-estacionales, estacionales, interanuales.
- Capacidad para evaluar la capacidad de pronóstico de la sequía a diversos plazos y escalas espaciales (predecibilidad) que lleve a conocer la habilidad de los modelos y esquemas de pronóstico actuales.
- Capacidad para caracterizar la amenaza de sequía y con ello el riesgo que representa, con el fin de reducir la severidad de los daños sociales y económicos causados por ésta.

Es claro que cualquier programa de investigación como el propuesto anteriormente debe ir acompañado de un programa de formación de recursos humanos y generación de capacidades entre actores clave, lo que permitirá una transferencia adecuada de los desarrollos científicos a los operadores y gestores del recurso hídrico.

Tabla 1. Cuadro resumen de investigación en sequía meteorológica

Demanda de Investigación	Objetivo	Agencias responsables
Evaluación y propuesta de índices para el monitoreo de la sequía meteorológica en diversas regiones de México, que considere diversas fuentes de agua.	Un sistema de monitoreo en tiempo que integre datos meteorológicos in situ y por sensoramiento remoto.	CONAGUA SMN INEGI
Estudio de procesos climáticos (forzantes) que generan sequías en diversas escalas temporales y espaciales.	Identificación de los mecanismos físicos y las formas de sequía que generan.	SMN CONAGUA ESTADOS
Desarrollo de esquemas de pronóstico climático multi-modelo y multi-ensamble encaminadas a generar caracterización de la sequía.	Implementación de modelos del clima para simulaciones de sequías pasadas y pruebas de pronóstico estacional de evolución (inicio, duración, intensidad) de la sequía.	SMN CONAGUA
Estudio de la predecibilidad de la sequía con énfasis en inicio, duración, intensidad y duración en diversas escalas espaciales y temporales, así como plazos de pronóstico y condición inicial.	Un caracterización de la predecibilidad de sequía para identificar fuentes de incertidumbre, y niveles de confianza en los pronósticos probabilísticos multi-ensamble.	SMN CONAGUA CONACYT SEP
Usos de indicadores que representen la intensidad y duración de la sequía que sean claros para actores clave y tomadores de decisiones.	Revisión de los índices existentes usados para caracterizar la sequía y su representatividad en la caracterización de la sequía meteorológica.	SMN CONAGUA INEGI

5. INVESTIGACIÓN SOBRE SEQUÍA HIDROLÓGICA

El objetivo en materia de sequía es determinar la disponibilidad del recurso hídrico con el fin de planear su distribución y manejo, no sólo con medidas coyunturales, es decir al momento en que se presente la amenaza (sequía meteorológica), sino también de forma estructural, que permitan se reduzca la vulnerabilidad de las regiones, sectores y grupos sociales a este fenómeno. El trabajo en materia de sequía hidrológica debe desarrollarse de forma acoplada con el de los estudios climatológicos, ya que la información sobre cambios en el ciclo hidrológico debe incorporarse a las estimaciones de escurrimientos, infiltración, evapotranspiración, niveles de presas y otros almacenamientos, de forma que lleve a definir manejos de agua, oferta y demanda.

La recurrencia de la sequía es algo cierto. Cada evento es diferente, lo que plantea nuevos desafíos a causa del cambio socio-económico, así como de cambios en el contexto físico (cambios en la vulnerabilidad). Los hidrólogos tienen un papel fundamental en relación con la sequía y aspectos asociados a su predicción las políticas, la planificación y el diseño de infraestructura, en el desarrollo de tecnologías de conservación, y en investigación de procesos. La vulnerabilidad a la sequía meteorológica y el riesgo de sequía hidrológica son cada vez mayores por lo que se requiere analizar desde diversas ópticas el carácter multifactorial e interdisciplinario de la sequía. Dado que los impactos socioeconómicos de la sequía son más generalizados y diversos que antes, se necesita considerar el carácter dinámico de la vulnerabilidad en el sector hídrico. Uno de los grandes retos en este tema es la predicción de la ocurrencia de sequía hidrológica y las consecuencias que ésta pueda tener, con el fin de planificar e implementar acciones correctivas. La capacidad predictiva de los modelos hidrológicos está limitada por la habilidad de predecir la sequía meteorológica, pero en un sentido más completo las predicciones deben considerar escenarios bajo diversos contextos de manejo. Las acciones tradicionales para enfrentar la sequía, como el cambio de prácticas en el riego de cultivos, son efectivas cuando se dispone del recurso, pero ello requiere diseñar esquemas de gestión que vayan más allá de “cuánta agua tengo, cuánta entrego”. Las acciones

en el sector agua necesitan considerar aspectos como la recarga y el uso de las aguas subterráneas, para hacer factible la puesta en marcha de prácticas como el ajuste de precios, el racionamiento, o el intercambio de derechos de agua entre regiones, en un esquema de toma de decisiones con el menor costo económico, social y ambiental.

a) Los aspectos hidrológicos

Las decisiones políticas correctas sobre las consecuencias ambientales a largo plazo del uso del suelo y la gestión del agua son un problema de actualidad. Se requiere de planteamientos balanceados entre el riego agrícola, la conservación y la generación de energía, a partir de conocimientos relacionados con la sequía hidrológica. La disminución de la capacidad de suministro y el aumento de las demandas urbanas podrían ser factores críticos en futuras sequías hidrológicas en algunas cuencas. Para hacer frente a estas cuestiones, la investigación sobre sequía debe ser mejor integrada y llevada a cabo en un proyecto de gran escala, de forma continua.

Por tanto, y como en el caso anterior, es necesario trabajar en aspectos relacionados con:

- **Monitoreo**, considerando no sólo los sistemas in situ que permiten estimar la disponibilidad natural de agua en ríos, lagos y presas, sino también los sistemas de percepción remota para dar seguimiento a condiciones de humedad del suelo e incluso a cambios en los niveles de los acuíferos. En cada uno de los casos, se deben implementar técnicas y diseñar indicadores que traduzcan los datos en información sobre la sequía hidrológica, incluyendo una calibración sobre los valores críticos de los índices de sequía.
- **Entendimiento de procesos**, que lleven a analizar cómo una sequía meteorológica puede resultar en una sequía hidrológica o cómo esta última puede ocurrir aun sin déficit de precipitación, sino por una mala administración del recurso hídrico (vulnerabilidad). Adicionalmente, es necesario implementar modelos del ciclo hidrológico que tengan como finalidad contar con diagnósticos

de condiciones de sequía hidrológica recientes. En este sentido, se requiere medir la capacidad de los modelos en reproducir, con información histórica del clima, condiciones de sequía hidrológica.

- **Predicciones de sequía**, conociendo los niveles de confianza con que se pueden tener en ellas. Se reconoce que las predicciones a mediano y largo plazo son de tipo probabilístico por lo que se presenta una cascada de incertidumbre, cuyo origen está en las predicciones climáticas, y que se combina con fuentes de incertidumbre en los modelos hidrológicos. Cuantificar esta incertidumbre e incorporarla en la estimación del riesgo de sequía hidrológica es una de las metas que la investigación tiene. Los modelos acoplados clima-hidrología deberán ser adaptados para cada una de las regiones hidrológico-administrativas y las sub-cuencas correspondientes, con el fin de contar con información de mayor resolución espacial
- Un **modelo de riesgo de sequía hidrológica**, el cual contemple elementos para la planeación y la toma de decisiones. Esto requiere una aproximación al diagnóstico de la vulnerabilidad a nivel de cuencas, con el fin de identificar los factores que hacen particularmente sensible al sector hídrico a una sequía meteorológica y apuntar las acciones estructurales y coyunturales de respuesta a los déficit de precipitación a los elementos que mejores resultados puedan ofrecer en términos no sólo de costo-beneficio, sino de equidad, plazo, y beneficios adicionales que se puedan tener. Se deberá pasar de la visión tradicional de una descripción cualitativa de la vulnerabilidad, a una cuantificación de ésta y a un modelo de riesgo de sequía hidrológica para la planeación y respuesta en diversas escalas y plazos.

Las investigaciones en la materia resultarán en productos que puedan constituir una herramienta para la planeación y la gestión de riesgo de sequía hidrológica, de forma que de manera objetiva se cuente con elementos para decidir qué medidas preventivas y de mitigación deben tomarse en la CONAGUA para reducir los impactos negativos de una sequía meteorológica. Es claro que la investigación no responde al problema más general de la crisis del agua en México, solamente al reto de contar con Planes de Respuesta ante la Sequía, de acuerdo a lo establecido dentro del Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE) de México.

El objetivo del Programa de Investigación en Materia de Sequía Hidrológica deberá resultar en productos que apoyen la gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca considerando las capacidades de diagnóstico y pronóstico de disponibilidad de agua, en un contexto de gestión de riesgo, reconociendo que el manejo de la incertidumbre es la esencia de esta

actividad. En paralelo, se mejorarán las capacidades del personal y de los gestores y usuarios del agua en gran escala para realizar un manejo más apropiado del recurso, incluyendo las medidas de prevención y mitigación que se contemplen en PRONACOSE.

b) Los aspectos ambientales

Por otro lado, se sabe que la sequía impacta al medio ambiente, y que ecosistemas deteriorados pueden generar alteraciones climáticas e hidrológicas que resulten en sequía. Las plantas y animales dependen del agua, al igual que las personas. Cuando se produce una sequía, su suministro de alimentos puede reducirse y su hábitat puede ser dañado. A veces el daño es sólo temporal y su hábitat, así como el suministro de alimentos retorna a la normalidad cuando la sequía termina. Pero a veces el impacto de la sequía en el medio ambiente puede durar mucho tiempo, tal vez para siempre. A pesar de que bajo la legislación mexicana ya existe un volumen de agua destinado para el medio ambiente (caudal ecológico), la respuesta ante las sequías del hábitat natural no lo toma en cuenta apropiadamente, pues este puede ser función del socio-ecosistema considerado.

Los ejemplos de los impactos ambientales por sequía incluyen:

- La pérdida o destrucción del hábitat de los peces y la vida silvestre
- La falta de alimentos y agua potable para los animales salvajes
- Aumento de enfermedades en los animales debido a la reducción de alimentos y suministros de agua
- La migración de la fauna silvestre
- El aumento del estrés sobre las especies en peligro de extinción o incluso la extinción
- Los niveles más bajos de agua en los embalses, lagos y estanques
- La pérdida de los humedales
- Mayor probabilidad de incendios forestales
- Erosión eólica e hídrica de los suelos
- Una mala calidad del suelo

Por otra parte, son cada vez más sólidas las evidencias de que una degradación ambiental puede resultar en cambios climáticos locales, como una tendencia por ejemplo, a menos precipitación, y cambios en los niveles de escurrimiento e infiltración, con lo cual se altera el ciclo hidrológico de la zona. La sequía por otra parte, puede representar una afectación a la región y sus ecosistemas, con lo que podrían presentarse efectos de retroalimentación negativos que aumenten el riesgo de sequía hidrológica. Por ello, se

considera conveniente que en el contexto de sequía hidrológica se estudie:

- Servicios ecosistémicos (ambientales) y sequía
- Reducción de los impactos ambientales de la sequía en un marco de gestión de riesgo
- Estrategia de Monitoreo de impactos de la sequía
- Procesos y modelación de impacto
- Acciones de manejo de los recursos naturales bajo sequía meteorológica

- Acciones de protección de los ecosistemas de especies protegidas ante la sequía.
- Estrategias de conservación y restauración de hábitat afectados por la sequía.

Por lo anterior, un aspecto importante en el tema de sequía hidrológica es el ambiental. Con frecuencia se le deja en segundo término aun y cuando puede constituir un elemento que reduzca el riesgo.

Tabla 2. Cuadro resumen de investigación en sequía hidrológica

Demanda de Investigación	Objetivo	Agencias responsables
Sistema de monitoreo de disponibilidad de agua mediante sensores remoto y mediciones in-situ usando esquemas de asimilación.	Un sistema de monitoreo basado en esquemas de asimilación de datos.	CONAGUA INEGI
Desarrollo de un modelo de balance hídrico por cuencas de RHAs que sirva de referencia con base en información de los tres años más recientes.	Modelo de diagnóstico definiendo esquemas de validación para cuentas de disponibilidad de agua.	CONAGUA INEGI
Desarrollo de esquemas de pronóstico climático multi-modelo y multi-ensamble encaminadas a estimar disponibilidad de agua a partir del pronóstico climático.	Implementación de balance hídrico para simulaciones de sequías hidrológicas pasadas y pruebas de pronóstico estacional de evolución bajo diversos esquemas de manejo de agua.	SMN CONAGUA
Estudio de la predecibilidad de la sequía hidrológica con énfasis en inicio, duración, intensidad y duración en diversas escalas espaciales y temporales, así como plazos de pronóstico y condición inicial (Nivees de confianza en los pronósticos).	Una caracterización de la predecibilidad de sequía para identificar fuentes de incertidumbre, y niveles de confianza en los pronósticos probabilísticos multi-ensamble. Escenarios de disponibilidad de agua bajo sequía con y sin medidas de adaptación.	SMN CONAGUA CONACYT SEP
Usos de indicadores que representen la intensidad y duración de la sequía hidrológica que sean claros para actores clave y tomadores de decisiones	Revisión de los índices existentes usados para caracterizar la sequía y su representatividad en la caracterización de la sequía hidrológica.	SMN CONAGUA INEGI
Análisis de la gestión de riesgo de sequía hidrológica en el norte de México, que ponga en riesgo el cumplimiento de los tratados del Agua con Estados Unidos.	Desarrollar un esquema de manejo de agua que garantice disponibilidad para dar cumplimiento a los tratados de Agua de 1944.	CONAGUA, SRE, SAGARPA
Esquemas de gestión de riesgo en ecosistemas bajo estrés hídrico, considerando procesos, vulnerabilidad y resiliencia.	Esquema de manejo de ecosistemas en riesgo por sequía	SEMARNAT CONABIO CONANP

6. LA SEQUÍA AGRÍCOLA

El agua es el recurso clave en la agricultura, particularmente cuando se desarrolla en un ambiente semiárido como en gran parte de México. El agua para la agricultura está sin embargo, en competencia directa con el agua para uso urbano y por tanto, en situación difícil cuando se trata de situaciones de sequía intensa o prolongada. El riesgo de sequía agrícola varía entre regiones debido a las diferentes prioridades en el uso del recurso hídrico. Es importante señalar que el mayor usuario del agua es el sector agrícola, así que la disminución de un porcentaje pequeño permite disminuir la vulnerabilidad de otros sectores, y por el contrario, el aumento en el consumo de agua en un pequeño porcentaje afecta de forma importante la disponibilidad de agua.

Los objetivos de investigación en materia de sequía agrícola van por tanto ligados a comprender mejor cómo el uso del agua por tipo de cultivo responde a dicho entorno climático. Un conocimiento mejorado en este sentido, podrá apoyar la gestión adaptativa en el sector agrícola y fomentar el uso sostenible del agua en una época de incertidumbre y de cambios climáticos. A pesar de que este ha sido un planteamiento tan antiguo como la historia de la agricultura misma, hoy adquiere niveles de seguridad nacional, pues aún se desconocen las condiciones de peligro climático que resultan en niveles de afectación particulares, en un marco de gestión del riesgo.

Un planteamiento de investigación en materia de sequía agrícola trata de responder a preguntas como: 1) ¿De qué manera la vulnerabilidad a la sequía varía según la región o el tipo de cultivo? 2) ¿Cuál es el impacto de la sequía en el consumo de agua para uso agrícola a diferentes escalas espaciales?, 3) ¿Qué opciones de adaptación están disponibles a través de cambios en los cultivos y en el mercado de transferencias de agua, si se cuenta con poco tiempo de alertamiento? y 4) ¿Cuáles son los costos y beneficios económicos de las diferentes estrategias de adaptación en diferentes escenarios de sequía a nivel de parcela, ejido o cuencas hidrográficas? 5) ¿Cuáles son las consecuencias ambientales de la sequía agrícola? 6) ¿cómo se pueden modificar las estrategias de riesgo para adaptarse a una condición de sequía?

Los impactos de la sequía en el sector agrícola son quizá los más documentados. La sequía 2010-2012 en el norte de México alcanzó niveles de desastre sin precedente. Pero el problema de impactos de la se-

quía en agricultura llega incluso a aquellos sistemas más desarrollados, y que en principio, tienen acceso a modelos avanzados de información climática. Por ejemplo, un nuevo informe de la Universidad de California, Davis indica que, la agricultura de California está enfrentando la peor sequía en décadas usando sus reservas de agua subterránea, lo que le ha permitido en cierta medida sortear las dificultades que el fenómeno presenta. Pero esta estrategia puede llegar a fallar si se sigue tratando a esas reservas de agua como ilimitadas. El estudio encontró que la sequía - la tercera más grave que se conoce en décadas recientes - es responsable de la mayor pérdida de agua se haya visto en la agricultura de California. Sin embargo, el estudio también muestra la importancia de contar con aguas subterráneas como reserva para enfrentar periodos de sequía en un sector como el agrícola.

Esta no es la situación del norte de México, donde la agricultura sobreexplota de forma continua las fuentes de agua subterránea hasta ponerla en condiciones críticas. La alta dependencia de los acuíferos para esta actividad, aun en periodos sin sequía, hace a los agricultores altamente vulnerables a la sequía por lo que muchos de los esfuerzos de investigación en la materia deberán estar dirigidos a cómo impulsar un nuevo modelo de aprovechamiento hídrico que permita gradualmente sanear la condición de las reservas de agua subterránea que han sido sobreexplotadas. Dicho planteamiento pasa por una revisión de las estrategias de riesgo seguidas hasta ahora, y que deberán ser cambiadas para incrementar la productividad hídrica en el campo mexicano. Los estudios sobre optimización de la irrigación en la agricultura mexicana son un elemento necesario del Plan de Investigación sobre Sequía Agrícola.

El uso de aguas residuales para el riego es una práctica común en las zonas rurales y peri-urbanas de la mayoría de los países en desarrollo. Las aguas residuales son a menudo la única fuente de agua para el riego en estas zonas. Incluso en las zonas en las que existen otras fuentes de agua, los pequeños agricultores a menudo prefieren las aguas residuales debido a su alto contenido de nutrientes se reduce o incluso elimina la necesidad de costosos fertilizantes químicos. Las aguas residuales generan micro-economías para mantener a innumerables personas, por lo que eliminarlas o sobre-regular su uso podría quitarles la única oportunidad de ingresos.

Las preguntas clave de investigación

¿Cuáles son los peligros de riego con aguas residuales sin control en términos de la salud pública y la contaminación? ¿Cómo puede evaluarse el valor de los nutrientes de las aguas residuales? ¿Qué prácticas sostenibles se están utilizando y han mostrado beneficios a las zonas rurales? Desde una perspectiva de salud pública ¿qué cultivos son los mejores candidatos para el riego con aguas residuales y qué se debe evitar?

Un aspecto adicional sobre la sequía y la agricultura, es la relacionada con las plagas. En diversos estudios y entrevistas con actores clave del sector se sugiere que la aparición de plagas está íntimamente relacionada con las condiciones climáticas extremas como la sequía.

Se debe considerar el efecto que la sequía tiene en el sector ganadero, ya que la sequía agrícola lleva a falta de alimentos para el ganado lo que ocasiona muerte y fuertes pérdidas económicas. La investigación en materia de sequía y ganadería deberá contemplar las acciones del sector que lo hagan menos vulnerable a falta de alimentos incluyendo acciones técnicas, financieras y ambientales.

Bajo el contexto en el que se desea abordar el problema de sequía, se plantean cuatro líneas de investigación para el análisis de riesgo:

- 1) **Monitoreo** de condiciones de sequía agrícola, en donde los sensores remotos jueguen un papel de gran importancia para establecer las relaciones clima – cultivos en zonas de gran producción (grandes extensiones), que lleven a construir modelos para proyectar las condiciones del sector usando predicciones climáticas. El monitoreo también debe incluir regiones de referencia donde la relación tipo y variedad de cultivo muestre su resistencia al déficit de humedad del suelo, mostrando las ventajas de variedades resistentes o menos demandantes de agua. Los modelos de monitoreo y diagnóstico se vuelven así la base para ir analizando los efectos de la sequía conforme ésta avanza, incluyendo los desfases señal en el clima – impacto en el cultivo. El monitoreo debe incluir mediciones de los volúmenes de agua utilizados por los diversos usuarios en los diversos cultivos. Esta información es indispensable para el balance de agua y crítica en condiciones de sequía.
- 2) **Entendimiento de la sequía agrícola**, en donde analicen los procesos planta con requerimientos climáticos de diversas variedades de cultivos que puedan constituir una opción en el sector agrícola frente a condiciones de sequía y en acciones como las sugeridas en el PRONACOSE, con especial énfasis en estrategias de riego. El trabajo debe documentar las formas en que se responde tradicionalmente a la sequía, y proponer nuevas estrategias de ges-

tión de riesgo que puedan considerarse acciones de reducción de vulnerabilidad estructural frente a la sequía hidrológica o meteorológica. Se incluirán en este rubro, el estudio y las propuestas de solución para disminuir vulnerabilidad del sector ganadero.

- 3) **Predicciones y escenarios** en el sector agrícola bajo diversas condiciones de sequía incluyendo acciones de respuesta implementadas o funcionamiento del sistema bajo el marco de trabajo tradicional. Las predicciones y escenarios requieren un esquema de validación utilizando información de rendimiento, siniestralidad y de ser posible, el efecto de acciones de prevención o respuesta frente a la sequía.
- 4) **Modelo de gestión de riesgo**, que considere la sensibilidad del agro-ecosistema a reducción de la vulnerabilidad factor a factor, y que permita estimar niveles de riesgo crítico y opciones de prevención o mitigación para reducir la magnitud de la sequía agrícola. Los modelos deben considerar los costos de las acciones y los beneficios en el sector en el corto y en el largo plazo.
- 5) **Opciones de gestión de agua bajo sequía en la agricultura**, incluyendo opciones para el riego, el uso de aguas residuales, y otras fuentes, considerando factores de salud, ambientales, económicos y sociales entre los productores.

La agricultura es una tarea de alto riesgo en México debido a una combinación condiciones climáticas adversas, pérdida de fertilidad del suelo, bajo acceso a los mercados de insumos y productos, y en el caso de pequeños productores, falta de apoyos económicos. Estos factores, combinados con la aversión al riesgo de los agricultores, limitan las inversiones en nuevas estrategias en la agricultura, lo que resulta en baja competitividad, con bajos ingresos, y con frecuencia, en pobreza. La limitada inversión en nuevas prácticas deja propenso al sector a las crisis por sequía y lleva a muchos hogares a la pérdida de activos. Por lo tanto, la pobreza se añade como factor determinante a riesgo de sequía agrícola e incluso social. Hacer frente a la vulnerabilidad ante la sequía en las comunidades agrícolas está en el núcleo de la reducción del riesgo de sequía y la inseguridad alimentaria.

Las estrategias para la reducción del riesgo de sequía agrícola necesitan abarcar la gestión sostenible de los paisajes agroecológicos para impulsar la producción agrícola, así como medidas para mejorar el acceso a los alimentos, para garantizar la salud de las personas, y para reducir la pobreza en la agricultura. Los modelos de productividad agrícola deberán por tanto considerar si, las relaciones clima-cultivo, pero en buena medida deben incluir los factores socioeconómicos que limitan la capacidad de respuesta frente a este fenómeno, analizando acciones que aumenten la resiliencia del sector.

Los aspectos económicos son parte fundamental de la investigación en sequía agrícola, por lo que se debe estudiar adicionalmente:

- Los costos directos e indirectos de la sequía, por sector y región
- Las inversiones – opción en tiempos de sequía
- Los costos de la reducción de la vulnerabilidad

a la sequía, de la prevención ante sequía y de la respuesta a la emergencia

- La economía (formal e informal) durante la sequía
- Migración por sequía y economía
- Respuesta social a cambios en los tipos y prácticas de cultivos ante la sequía
- Estrategias de respuesta coyuntural ante la sequía (manejo del riesgo)

Tabla 3. Cuadro resumen de investigación en sequía agrícola

Demanda de Investigación	Objetivo	Agencias responsables
Evaluación y propuesta de índices para el monitoreo de la sequía agrícola que tome en cuenta datos de condición del agroecosistema bajo estrés hídrico	Un sistema de monitoreo en tiempo que integre datos obtenidos in situ y por sensoramiento remoto	SAGARPA CONAGUA INEGI
Estudio de procesos de respuesta de cultivos bajo condiciones de estrés hídrico que lleve a definir esquemas de manejo de respuesta.	Identificación de los mecanismos fisiológicos de respuesta de un cultivo ante estrés hídrico bajo sequía y con diversas estrategias de manejo	SAGARPA CONAGUA
Desarrollo de esquemas de pronóstico climático multi-modelo y multi-ensamble encaminadas a generar caracterización de la sequía agrícola	Implementación de modelos del clima para simulaciones de sequías pasadas y su impacto en agricultura	SMN CONAGUA SAGARPA
Usos de indicadores que representen la intensidad y duración de la sequía que sean claros para actores clave y tomadores de decisiones	Revisión de los índices existentes usados para caracterizar la sequía y su representatividad en la caracterización de la sequía meteorológica.	SMN CONAGUA INEGI
Opciones de manejo del riesgo para hacer frente a condiciones de sequía	Crear escenarios de respuesta del agroecosistema ante diversas estrategias de riesgo	INIFAP SAGARPA
Impactos del uso de aguas residuales en el sector agrícola, considerando los impactos en la salud o ambientales.	Encontrar las mejores opciones de uso de aguas residuales bajo condiciones de sequía (cultivos, prácticas, impactos, costos)	SAGARPA INIFAP SALUD SE

7. LA SEQUÍA SOCIOECONÓMICA

Los impactos sociales de la sequía son formas en que dicha condición afecta a la salud, el desarrollo económico y social, y la seguridad de las personas. Los impactos sociales incluyen la seguridad pública, la salud, los conflictos entre las personas cuando no hay agua suficiente para todos, y los cambios de estilo de vida. Algunos ejemplos de impactos sociales incluyen:

- La ansiedad o la depresión por las pérdidas económicas causadas por la sequía
- Los problemas de salud relacionados con los flujos de agua bajos y mala calidad del agua
- Los problemas de salud relacionados con el polvo
- Amenaza a la seguridad pública de un mayor número de incendios de bosques y pastizales
- Reducción de los ingresos y aumento en los costos del servicio agua
- Las personas pueden tener que pasar de las granjas a las ciudades o de una ciudad a otra
- Menos actividades recreativas

Diversos análisis muestran que una sequía meteorológica lleva a sequía hidrológica o agrícola, y en su nivel extremo a sequía social. Es en esta última donde la condición climática genera conflictos que van más allá de los impactos económicos o ambientales. La historia de México sugiere que las condiciones de sequía se presentaron en periodos de movimientos sociales importantes, pues generaron contextos de hambruna. Hoy en día, muchas de las repercusiones de la sequía generan movimientos que llevan el impacto regional de una sequía a otras regiones donde incluso, no se presenta este fenómeno. El problema

no sólo se presenta el interior del país, sino que involucra a países vecinos. Así, la migración de mexicanos, afectados por la sequía, a Estados Unidos parece incrementarse. Pero el problema también es de Centro América hacia México. En regiones de Guatemala, donde la sequía meteorológica comienza a traducirse en hambruna, la migración de guatemaltecos hacia Chiapas se incrementa.

A nivel urbano, la sequía social es un problema latente. La Ciudad de México es un modelo de metrópoli altamente vulnerable a la sequía. Sus altas demandas de agua, su dependencia de fuentes externas de la cuenca, y la obsolescencia de su infraestructura hidráulica acompañada de manejos tradicionales del sector, generan con mayor frecuencia condiciones de riesgo que se traducen en condiciones que pueden considerarse de sequía social. Otras zonas urbanas en rápida expansión en México siguen el modelo de explotación hídrica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y con ello, enfrentan problemas similares, aunque con frecuencia, en regiones con mucha menor disponibilidad natural de agua.

- Escasez de cantidad y calidad de alimentos.
- Problemas de salud y aumento de morbilidad en sectores vulnerables
- Conflictos entre usuarios y sectores del agua.
- Desigualdad en la absorción del impacto.
- Baja de la calidad de vida e incremento de la pobreza.
- Inestabilidad social, marginación y migración hacia áreas urbanas o al extranjero

Tabla 4. Cuadro resumen de investigación en sequía socioeconómica

Demanda de Investigación	Objetivo	Agencias responsables
Identificación y mapeo de zonas con conflictos por acceso al agua en México, estableciendo las causas y las opciones de solución usando escenarios bajo sequía social	Un diagnóstico de problemas sociales relacionados con acceso al agua estableciendo niveles de riesgo	SEDESOL, INEGI, SEGOB, CONAGUA
Estudio de impactos sociales de la sequía documentando eventos de sequía intensa reciente.	Identificación factores de vulnerabilidad y riesgo ante la sequía, validando el modelo mediante una medición de impactos	SEDESOL, CONAGUA, INEGI
Estudio de migración por sequía dentro de México, hacia y desde el extranjero, que llevan a impactos en salud, economía y medio ambiente.	Metodología para monitorear y analizar procesos de migración por factores ambientales (sequía)	SEGOB, SEDESOL, SRE, SALUD
Efecto social de las acciones de prevención y respuesta oficial ante la sequía desde el punto de vista social, económico y ambiental	Una caracterización de los costos económicos, sociales y ambientales de la respuesta tradicional ante la sequía.	INEGI, Economía, SEDESOL, SEMARNAT

8. LAS LECCIONES APRENDIDAS

a) La sequía en California

Alrededor de dos terceras partes de California se encuentra en sequía “extrema” o “excepcional”, las dos categorías más graves, de acuerdo con el Monitor de Sequía de los Estados Unidos. La sequía es la más severa en California por lo menos desde 1977. Un número de incendios récord, embalses contraídos y pastos secos en los jardines son signos de los tiempos actuales, en que California parece encaminarse a un cuarto año de sequía. El año hidrológico 2014 fue uno de los más secos de la historia, y los administradores del agua en todo el estado están echando una mirada cautelosa hacia la atmósfera para ver si el patrón seco terminará pronto. De acuerdo con el Monitor de Sequía, el 82 % de California se encuentra ahora en una sequía extrema y casi el 60 % está en la sequía excepcional, la categoría más severa. Con previsiones climáticas que sugieren que las condiciones inusualmente secas continuarán durante los próximos meses, las autoridades del agua locales, estatales y federales se están preparando para otro año difícil en 2015.

Hacia finales de 2014, la condición de sequía en California incluía:

- La disminución de los embalses. Ocho de los 12 principales embalses de California están en o por debajo de la capacidad del 30% y todos por debajo de los promedios históricos.
- El agua con uso restringido. Más de 250 comunidades han adoptado alguna forma de conservación obligatoria del agua en 2014, con restricciones en el uso del agua y hasta racionamientos en algunas áreas, con el fin de mantener el agua en la reserva para el próximo año.
- Las asignaciones se han recortado. Las entregas de agua proyectadas para el Estado se redujeron un 5% con respecto de los suministros solicitados en 2014, y en algunos casos (Proyecto del Valle Central) las entregas se vieron reducidas a cero. Los usuarios del agua afectados usan sus reservas o bombean agua subterránea para satisfacer sus necesidades.
- Se incrementa el uso de aguas subterráneas en las cuencas. Con escasos recursos hídricos de superficie, los productores y otros usuarios volvieron a las aguas subterráneas para sostener los campos

y huertos. En muchas zonas, el aumento de bombeo añadió más presión a las cuencas y empujó niveles de agua subterránea a niveles históricamente bajos. Algunos pozos se han secado en algunas comunidades.

- El impacto en la economía agrícola. De acuerdo con la Universidad de California Davis, California perdió más de 17,100 puestos de trabajo estacionales en el sector agrícola, al quedar 428.000 acres (o el 5%) de las tierras de cultivo de regadío ociosas en 2014. Las pérdidas económicas se estiman en US\$ 2,2 mil millones.
- Incendios Forestales. Los funcionarios estatales reportan un aumento significativo de los incendios forestales en California en el año 2014. Desde el 1 de enero el Call Fire ha respondido a 5.373 incendios forestales que quemaron más de 92.027 hectáreas, muy superior al promedio anual de 4399 incendios forestales.

Los impactos negativos de la sequía en California representan una oportunidad para otros. Por ejemplo, la sequía agrícola ha hecho que los productores de aguacate de California dejen de producir con lo que las ventas de aguacate mexicano a los Estados Unidos han aumentado.

b) La sequía en México

De los episodios de sequía en años recientes en México son los episodios de 1997-1998, el de 200-2002 y el de 2010-2012 los más relevantes por sus impactos, aunque no los más intensos. El primero de los referidos fue resultado de las condiciones El Niño dominantes que afectaron con un fuerte déficit de precipitación la zona centro y sur de México principalmente. Las condiciones de déficit de humedad en la vegetación resultaron en condiciones propicias para incendios forestales récord, debido al uso del fuego en la agricultura. En el caso de la sequía del 2000-2002, su impacto principal fue los déficit de agua en la cuenca del Río Conchos que derivó en conflictos con Estados Unidos por la imposibilidad de cumplir con los compromisos del Tratado de Aguas Binacionales de 1944. EL caso de la sequía más reciente, los impactos en el sector agropecuario fueron de grandes dimensiones económicas y sociales, lo que ha llevado a que las

autoridades del agua comiencen a diseñar estrategias que lleven a reducir la vulnerabilidad ante la sequía meteorológica.

Las lecciones aprendidas en México son que los impactos son diversas, pero destaca el hecho de que históricamente la sequía puede afectar de diversas

formas, en diversos sectores y regiones, y sobre distintos sectores de la sociedad lo que lleva a concluir que la sequía debe ser analizada desde la perspectiva de un problema de riesgo a escala regional, por sector y por grupo social, énfasis que debe acentuarse en las necesidades de investigación.

9. LA COMUNICACIÓN SOBRE SEQUÍA

La sequía es frecuente y causa miles de millones de pesos en daños en México. La información de alerta temprana, como la requerida por PRONACOSE, incluye diagnósticos y pronósticos del clima e información hidrológica, para ayudar a los tomadores de decisiones a prepararse y reducir los impactos. Pero ¿qué información sobre sequía realmente utilizan y necesitan los tomadores de decisiones? En general, son los administradores del agua y los agricultores los que parecen mostrar mayor preocupación por las sequías, pues esperan que se conviertan en más frecuentes y graves. Existe entre ellos la esperanza de que una mejor información de alerta temprana podría ayudar a reducir los costos de la sequía, lo que abre la posibilidad de aprovechar la información climática para reducir los impactos. Pero pasar de los resultados de la investigación científica a planes de acción concretos, y más aún, a la aceptación por parte de autoridades y actores clave es un proceso que va más allá de documentar las anomalías en un sector. Es por ello que un plan de investigación de considerar la componente de generación de capacidades entre actores clave mediante esquemas de comunicación.

La sequía significa diferentes cosas para diferentes personas, lo que resulta en innumerables indicadores y necesidades de información, pero en algunas partes del mundo se encuentra que los administradores del agua y usuarios clave coinciden en los atributos deseables de la información sobre sequía, por ejemplo, en términos de los indicadores. Los gerentes quisieran ver una serie de indicadores, para cada lugar, en términos comparables y coherentes, escalables a través de diferentes épocas y regiones, y en relación a las condiciones de sequía históricas, de entre las cuales pudieran “escoger y elegir” para evaluar, comparar y comunicar las condiciones de sequía. Lo anterior lleva a plantear como un requisito esencial de un programa de investigación sobre la sequía, el diálogo con actores clave para definir las formas de presentar la información. El espacio que se ha abierto en PRONACOSE, con los consejos de cuenca, puede ser de gran ayuda para definir una estrategia de comunicación útil, que permita pasar de los trabajos puramente científicos, a la construcción de información útil en materia de sequía.

Tabla 5. Investigación en materia de comunicación de la sequía

Demanda de Investigación	Objetivo	Agencias responsables
Diagnóstico de percepción de riesgo ante sequía entre actores clave y análisis de tipo de información que podría inducir la acción preventiva	Estudio entre actores clave que permita sugerir cómo presentar información sobre sequía que lleve a implementar acciones	CONAGUA INEGI SEGOB
Estrategia de acción de un programa de cultura del agua bajo condiciones de sequía social.	Diseño mejorado de un programa de cultura del agua	CONAGUA Gobiernos municipales

10. LAS ACCIONES DEL CORTO PLAZO

Como en otras partes del mundo (Estados Unidos, Europa, África) las primeras acciones para diseñar una estrategia de acción frente a la sequía es conformar grupos de trabajo integrados por especialistas, por actores clave y por tomadores de decisiones. Se han dado pasos en esta dirección con la integración de un Comité Técnico de la Sequía, un Comité Intersecretarial de Sequía y organizaciones dentro de los Consejos de Cuenca como parte de PRONACOSE. Del trabajo del Comité Técnico Asesor con las autoridades de las instituciones de Gobierno y actores clave se puede llegar a un consenso entre la información que se desearía tener para la toma de decisiones, y lo que es posible entregar con cierto nivel de confianza. De esta forma se evita que se deje en manos de los investigadores el objeto del programa de investigación, pero se garantiza que se tratará de utilizar el conocimiento del estado del arte disponible.

La filosofía de trabajo en un programa de investigación es reconocer que el modelo de trabajo frente a la sequía es insuficiente y quizá inadecuado, pues los resultados así lo indican. Hasta ahora, se parte (equivocadamente) del paradigma de que la sequía es impredecible y por ello sólo se puede responder al desastre. Los científicos del clima, los hidrólogos y los agrónomos son parte fundamental tanto en la definición de los proyectos, sus objetivos, metas y

asignaciones, así como en la evaluación de los resultados, asegurándose de que sea clara la rendición de cuentas por parte de los responsables de proyecto y de los usuarios de la información.

El Grupo de Trabajo de Sequía puede lograr avances significativos en la capacidad del país en monitorear, entender y predecir la sequía. Se espera que los resultados de la investigación producidos para ayudar el marco de PRONACOSE. Será una de las metas contar con un desarrollo de sistema de alerta temprana, que integre los resultados de los diversos grupos responsables de proyecto, y que en el plazo de tres años se cuente con los elementos necesarios para su puesta en marcha. En gran medida, el progreso dependerá de los logros de los proyectos de investigación financiados por las agencias de gobierno, y por las colaboraciones de los grupos responsables, con otros grupos en el mundo que persiguen fines similares. El grupo podrá actuar como facilitador de la comunicación entre proyectos, para integrar Los objetivos generales de la Fuerza de Tarea son para facilitar la colaboración entre los proyectos, el desarrollo de indicadores para evaluar la calidad de la supervisión y predicción de los productos, y desarrollar un sistema experimental de monitoreo y predicción de sequías, que incorpora y evalúa los avances recientes.

11. CONCLUSIONES

Hay una necesidad urgente de mejorar la preparación para la sequía a través de un mayor conocimiento, planes de gestión de sequía y una mejorada interfaz ciencia-política que reduzca la vulnerabilidad a la sequía futura y los riesgos que ésta plantea. Un mayor conocimiento de las sequías pasadas (procesos subyacente, frecuencias, niveles de intensidad y escalas espaciales de afectación), requiere en particular, la conducción de estudios para establecer los factores atmosféricos y las características de los eventos históricos de sequía más intensos, así como la magnitud de los impactos ambientales y socio-económicas que en pequeña escala aparecen, principalmente en regiones con escasez de agua. Analizar las formas en que se han dado las respuestas a eventos de sequía en el pasado e identificar ejemplos de buenas prácticas y lecciones aprendidas es crucial para el desarrollo de la planificación de la gestión de la sequía, tal como lo es establecer un conjunto de indicadores de sequía que integran factores físicos, económicos y sociales.

En diversos foros se han identificado y priorizado áreas de investigación que en general coinciden con muchas de las aquí propuestas. Algunas de las más relevantes son:

- a) Regionalización de áreas que tomen en cuenta el tejido social, identidad, vulnerabilidad socio-ambiental y cultura, así como la percepción social del riesgo y etno-hidrología.
- b) Ordenamiento territorial para minimizar asentamientos humanos en zonas de riesgo de sequías.
- c) Estudios de factibilidad para la generación de energía eléctrica a partir de energía solar, eólica y marítima en la zona costera, como medida para diversificar el desarrollo económico de las zonas de riesgo de sequías y relajar la presión por el recurso hídrico para riego agrícola y doméstico.
- d) Estudios sobre comercio de agua virtual como fuente de abastecimiento de agua a largo plazo.
- e) Desalación (agua de mar y agua salobre) como opción para abastecimiento de agua, considerada esta opción después de la evaluación de sus implicaciones ambientales.
- f) Mecanismos para la utilización de recursos finan-

cieros y transparencia de las finanzas públicas en los tres órdenes de gobierno.

- g) Estudios sobre cambios en patrones de cultivo en los distritos de riego del norte del país.

Será necesario transitar verdaderamente de la respuesta al desastre a la prevención del mismo, tal como lo ha sugerido el Gobierno Mexicano, apoyando a diversos grupos y sectores en la autogestión del riesgo. Pero para poder actuar es necesario analizar en qué medida el conocimiento desarrollado hasta ahora puede ayudar, y los elementos sobre los diferentes tipos de sequía que deben investigarse para contar con conocimiento más sólido e información más confiable. Siempre se debe tener en mente que la prevención paga al menos al seis por uno con respecto de la respuesta a la emergencia, así que la inversión en ciencia sobre la sequía, que lleve a mejores elementos para la planeación y la toma de decisiones siempre será una medida adecuada.

Aunque en México la investigación en materia climática se ha concentrado en buena medida en aspectos del cambio climático, es necesario regresar a las bases del funcionamiento del fenómeno y de los impactos que tiene. Aun hay grandes incertidumbres sobre si la sequía meteorológica será más o menos intensa en el presente siglo, pero es seguro que los episodios secos continuarán y la reducción de la vulnerabilidad ante los déficit de precipitación se hace necesaria, y transita por el entendimiento de los acontecimientos de este tipo en el pasado cercano que lleven a prepararse ante los que pudieran ocurrir en el futuro.

Finalmente, es necesario enfatizar que en conjunto con mayor inversión para la investigación científica y formación profesional, es necesario crear centros de investigación que alberguen científicos jóvenes interesados en dar respuesta a muchos de los problemas de este país. El conocimiento que pueden generar hará más sólida la planeación y el desarrollo, y permitirá poco a poco dejar atrás el modelo de gestión que pasa de problemas con inundaciones a problemas de falta de agua.

12. REFERENCIAS

- Acosta, J. A., Acosta, E., Padilla, S., Goytia, M. A., Rosales, R., & López, E. (1999). Mejoramiento de la resistencia a la sequía del frijol común en México. *Agronomía Mesoamericana*, 10, 83-90.
- Arreola-Ortiz, M. R., & Návar-Cháidez, J. D. J. (2010). Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México. *Investigaciones geográficas*, (71), 7-20.
- Bellon, M. R., Gómez, J. A. A., Smalel, M., Berthaud, J., Rosas, I. M., Solano, A. M., & Martínez, R. (2004). Intervenciones participativas para la conservación del maíz en fincas de los Valles Centrales de Oaxaca, México. *Manejo de la Diversidad de los Cultivos en los Agroecosistemas Tradicionales*, 118-123.
- Broad, K., A. Pfaff, R. Taddei, A. Sankarasubramanian, U. Lall and F. D.A. Filho 2007: Climate, stream flow prediction and water management in northeast Brazil: societal trends and forecast value. *Climatic Change*, 84, 217-239.
- Brown, C., E. Conrad, A. Sankarsubramanian, S. Someshwar, and D. Elazegui. "The Use of Seasonal Climate Forecasts within a Shared Reservoir System: the Case of Angat Reservoir, Philippines." In Ludwig, F. et al. (eds), *Climate Change Adaptation in the Water Sector*. London: Earthscan, 2009.
- Combs, S. (2012). The impact of the 2011 drought and beyond. Texas Comptroller of Public Accounts.
- Dai, A.G., K.E. Trenberth, and T.T. Qian, 2004: A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130
- Delgadillo-Macías J., T. Aguilar-Ortega y D. Rodríguez-Velázquez, 1999. 6. Los aspectos económicos de El Niño. En: Los impactos de El Niño en México. En Magaña R.V.O. (Ed.). Sep-CONACYT. 229 pp.
- Dow, Kirstin, Richard L. Murphy, and Gregory J. Carbone, 2009: Consideration of User Needs and Spatial Accuracy in Drought Mapping. *Journal of the American Water Resources Association*, 45, 187-197.
- Escalante-Sandoval C., Reyes-Chávez L., 2012: Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012.
- García-Acosta, V.; J. M. Pérez; y A. Molina. (2003). *Desastres Agrícolas en México. Catálogo Histórico. Tomo I. Épocas prehispánica y colonial 958-1822*. CIESAS-FCE. México. 506 pp.
- Garza Merodio, G. G. (2002). Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX. *Investigaciones geográficas*, (48), 106-115.
- González-Jácome, A. (2004). Ambiente y cultura en la agricultura tradicional de México: casos y perspectivas. Universidad Autónoma del Estado de México, Programa Editorial Universitario.
- Hansen, J.W., A. Challinor, A. Ines, T. Wheeler, and V. Moron 2006: Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Climate Research*, 33, 27-41.
- Hartmann, H.C, T.C. Pagano, S. Sorooshian, and R. Bales 2002: Confidence Builders, Evaluating Seasonal Climate Forecasts from User Perspectives. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 683-698.
- Hayes, M. J., M. D. Svoboda, D. A. Wilhite and O. V. Vanyarkho, 1999: Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80. 429-438.
- Hernández Cerda M. E. y G. V. Madero, 2004: Sequía meteorológica, en Cambio climático: una visión desde México. Ed. J. Martínez, A. Fernández y P. Osnaya, INECC.
- Karl, T. R., 1986: The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 77-86.
- Kunkel, K. E., P. D. Bromorski, H. E. Brooks, T. Cavazos, and 10 co-authors, 2008 : Observed changes in

weather and climate extremes in *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate*. T. R. Karl, G. A. Meehl, C. D. Miller, S. J. Hassol, A. M. Waple, and W. L. Murray (eds.). A Report of the U. S. Climate Change Science Program, Washington, D. C.

Landman, W.A., Mason, S.J., Tyson, P.D., and W.J. Tennant 2001: Statistical downscaling of GCM simulations to Streamflow. *Journal of Hydrology*, **252**, 221-236.

Lee, A. W. (2014). Reconceptualizing Environmental Migration: Empirical Findings from Downscaled Estimates of Drought in Rural Mexico (Doctoral dissertation, University Of Colorado At Boulder).

Lemos, MC, TJ Finan, RW Fox, DR Nelson and J. Tucker 2002: The use of seasonal climate forecasting in policymaking: lessons from Northeast Brazil. *Climatic Change*, **55** 479-507.

Lyon, B., L. Zubair, V. Ralapanawe, and Z. Yahiya, 2009: Fine-scale evaluation of drought hazard for tropical climates: Case study in Sri Lanka. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 77-88. Magaña, V. O. (ed.). (1999). Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil-Secretaría de Gobernación, México. 219 pp.

Magaña, V. y Neri, C. El Reto de México, 2012: Revista México social del Instituto de Capacitación, Estudios e Investigación en Desarrollo y Asistencia Social, S. C. Año 1 No. 23. Págs. 10-12.

Márdero S., E. Nickl, B. Schmook, L. Schneider, J. Rogan, Z. Christman, y D. Lawrence, 2012: Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. Invest. Geog no.78 México.

Mariotti A., S. Schubert, K. Mo, C. Peters-Lidard, A. Wood, R. Pulwarty, J. Huang, and D. Barrie, 2013: Advancing Drought Understanding, Monitoring, and Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, ES186-ES188. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00248.1>

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1995: Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, Ninth conf. on Applied Climatology. Dallas Tx, AMS, 233-236.

Méndez, J. M. y V. Magaña. (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. Vol. 23. No. 5. 1175-1188 pp.

Méndez, M. and V. Magaña, 2010: Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *J. Climate*, **23**, 1175-1188. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>

Mendoza, B. et al. 2005: Historical Droughts in Central Mexico and Their Relation with El Niño. *Journal of Applied Meteorology*, American Meteorological Society.

Meza, F.J, J.W. Hansen and D.E. Osgood, 2008: Economic Value of Seasonal Climate Forecasts for Agriculture: Review of Ex-Ante Assessments and Recommendations for Future Research. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 1269-1286.

Mitchell, R.B., W.C. Clark, D.W. Cash, and N.M. Dickson 2006: Global Environmental Assessments: Information, Institutions, and Influence. Cambridge, MA: The MIT Press.

Mo, K. C., and M. Chelliah, 2006: The modified Palmer Drought Severity Index based on the NCEP North American Regional Reanalysis. *J. Appl Meteor Climatology* **45**, 1362-1375.

Moron, V., A. Lucero, F. Hilario, B. Lyon, A.W. Robertson, and D. Dewitt, 2009: Spatio-temporal variability and predictability of summer monsoon onset over the Philippines. *Climate Dynamics*, **33**, 1159-1177.

National Research Council, 2009: Informing Decisions in a Changing Climate. Panel on Strategies and Methods for Climate-Related Decision Support, Committee on the Human Dimensions of Global Change. Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: The National Academies Press, 188 pp.

Nicholls, N., M.J. Coughlan, and K. Monnik 2005: The Challenge of Climate Prediction in Mitigating Drought Impacts. In, *Drought and Water Crises*, D.A. Wilhite, Ed. Taylor and Francis. pp. 33-51.

Ortega-Gaucin, D., 2012: Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. INSTITUTO DEL AGUA DE NL.

Palmer, W. C., 1965: Meteorological drought. Research paper 45. Weather Bureau, U. S. Department of Commerce.

Pereyra Díaz, D., & Sánchez Rodríguez, B. E. (1995). Sequías prolongadas y déficit hídrico en el Estado de Veracruz. In *La Ciencia y el Hombre* (Vol. 7, No. 21, pp. 153-67). México. Universidad de Veracruzana.

- Prairie, J., K. Nowak, B. Rajagopalan, U. Lall, and T. Fulp (2008), A stochastic nonparametric approach for streamflow generation combining observational and paleoreconstructed data, *Water Resour. Res.*, **44**, W06423, doi:10.1029/2007WR006684.
- Reynolds, J. F., Virginia, R. A., Kemp, P. R., de Soyza, A. G., & Tremmel, D. C. (1999). Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monographs*, **69**(1), 69-106.
- Sánchez Munguía, Vicente, "Context and implications for Resolving a Complex Binational Issue: Living the All-American Canal", en Sánchez Munguía, Vicente (coord.), *The U.S.-Mexican border environment: Living the All-American Canal: Competition or Cooperation for Water in the U.S.-Mexican Border?* San Diego, Ca., Southwest Consortium for Environmental Research and Policy, Monograph Series num. 13, San Diego State University Press-SCERP-El Colegio de la Frontera Norte, 2006, pp. 18.
- Schubert, S., D. Gutzler, H. Wang, A. Dai, T. Delworth, C. Deser, K. Findell, R. Fu, W. Higgins, M. Hoerling, B. Kirtman, R. Koster, A. Kumar, D. Legler, D. Lettenmaier, B. Lyon, V. Magana, K. Mo, S. Nigam, P. Pegion, A. Phillips, R. Pulwarty, D. Rind, A. Ruiz-Barradas, J. Schemm, R. Seager, R. Stewart, M. Suarez, J. Syktus, M. Ting, C. Wang, S. Weaver, and N. Zeng, 2009: A U.S. CLIVAR Project to Assess and Compare the Responses of Global Climate Models to Drought-Related SST Forcing Patterns: Overview and Results. *J. Climate*, **22**, 5251–5272.
- Seager R. and M. Hoerling, 2014: Atmosphere and Ocean Origins of North American Droughts. *J. Climate*, **27**, 4581–4606. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00329.1>
- Seneviratne S.I., 2012: Climate science: Historical drought trends revisited. *Nature* **491**, 338–339 doi:10.1038/491338a
- Sheffield, J., and E. F. Wood (2008), Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi scenario, IPCC AR4 simulations, *Clim. Dyn.*, **31**(1), 79-105.
- Sheffield, J., E.F. Wood, N. Chaney, K. Guan, S. Sadri, X.G. Yuan, L. Olan, A. Amani, A. Ali, S. Demuth, y Laban O'Gallo, 2012: A drought monitoring and forecasting system for Sub-Saharan African water resources and food security. *BAMS*, 861-882.
- Steinemann, A. C., 2006: Using Climate Forecasts for Drought Management. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **45**, 1353-1361.
- Thenkabail, P. S.; Gamage, M. S. D. N.; Smakhtin, V. U. 2004. The use of remote-sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia. Research Report 85. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- UNISDR, 2007. Drought, risk, reduction framework and practices: contributing to the implementation of the Hyogo framework for action. ISDR-WB. 07p
- Vilchis-Francés A. Y., Díaz-Delgado C. y Bâ Khalidou Mamadou, 2014: Sensibilidad de índices de sequía meteorológica para rangos de lluvia anual de 400 a 700 mm: XIII Congreso Nacional de Hidráulica AMH. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Villanueva-Díaz, J., J. Cerano Paredes, L. Vázquez Selem, D. W. Stahle, P. Z. Fulé, L. Yocom, O. Franco Ramos, J. A. Ruiz Corral, 2014: Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611*, dx.doi.org/10.14350/ig.42003
- Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V. K., & Pulwarty, R. (2014). Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes*.
- Xiao-Wei Quan, Martin P. Hoerling, Bradfield Lyon, Arun Kumar, Michael A. Bell, Michael K. Tippett, and Hui Wang, 2012: Prospects for Dynamical Prediction of Meteorological Drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1238–1252. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0194.1>

Lista de acrónimos

Acrónimo / Sigla	Descripción
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAZA	Comisión Nacional de Zonas Áridas
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PREMIA	Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua en México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (de México)
SMN	Servicio Meteorológico Nacional de México
PRONACOSE	Programa Nacional contra la Sequía
PMPMS	Programa de Medidas Preventivas y de Manejo de la Sequía
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación
SEGOB	Secretaría de Gobernación
SEP	Secretaría de Educación Pública
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SRE	Secretaría de Relaciones Exteriores
SENER	Secretaría de Energía
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua. Fue creado en Adobe InDesign CC, con la fuente tipográfica Soberana Sans y Soberana Titular en sus diferentes pesos y valores, y se utilizó papel con certificación medioambiental para su elaboración. Se imprimió en julio de 2015 en los talleres de XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, México, D.F.

