



ESTUDIO PARA DESARROLLAR EL MANEJO O GESTIÓN DE RIESGOS ANTE SEQUÍA

Convenio Específico de Colaboración 2017-B08-GD-09-RF-AD-A-CC-0001

Elaborado para la Comisión Nacional del Agua por:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña¹

Dr. J. Agustín Breña Naranjo¹

M.I. Úrsula Flores Gama²

M.I. Talisia A. Domínguez Sánchez²

M.I. Roberto A. Real Rangel²

¹Investigador, Instituto de Ingeniería UNAM

²Becario, Instituto de Ingeniería UNAM

Coyoacán, CDMX; noviembre de 2017

Título: Estudio para Desarrollar el Manejo o Gestión de Riesgos ante Sequía
Autor: Pedrozo Acuña, A.; Breña Naranjo, J. A., Domínguez Sánchez, T. A., Flores Gama, Ú. y Real Rangel, R. A.
Tipo de informe: Informe de actividades de Convenio Específico de Colaboración
Lugar: Coyoacán, CDMX, México
Institución: Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México
Fecha: 30 de noviembre de 2017
Páginas: 189
Idioma: Español
Derechos: Toda la información recopilada y generada, así como los resultados obtenidos y productos adquiridos para el presente desarrollo son propiedad de la Comisión Nacional del Agua.

Contenido

Introducción.....	1
Antecedentes y justificación.....	1
Objetivos.....	2
Estructura del documento.....	3
1. Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías de evaluación y cuantificación del riesgo ante sequías.....	5
1.1. ¿Qué es el riesgo?.....	5
1.2. Amenaza.....	10
1.2.1. Índices e indicadores de sequía.....	13
1.2.2. Umbrales de severidad.....	23
1.2.3. Análisis de frecuencia.....	24
1.3. Vulnerabilidad.....	25
1.3.1. Índice compuesto de vulnerabilidad.....	30
1.3.2. La vulnerabilidad como pérdidas derivadas de una sequía.....	46
2. Sintetizar la información necesaria para calcular y proponer métodos de evaluación de riesgo ante sequías para el territorio mexicano, proponiendo indicadores que permitan su estudio, cuantificación y monitoreo en México.....	55
2.1. Información disponible.....	55
2.1.1. Variables climatológicas e hidrológicas.....	56
2.1.2. Indicadores socioeconómicos.....	59
2.1.3. Indicadores de gestión de recursos hídricos.....	61
2.2. Evaluación del riesgo de sequía.....	64
2.2.1. Evaluación de la vulnerabilidad.....	65
2.2.2. Evaluación de la amenaza.....	67
3. Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías y planes de gestión de riesgo ante sequías a nivel internacional.....	69
3.1. Introducción.....	69
3.2. La unidad gestión y las partes interesadas.....	70

3.3. Paradigmas de la gestión del riesgo de sequía.....	72
3.4. La Gestión Estratégica del Riesgo de Sequía.....	74
3.5. La gestión del riesgo de sequía en el mundo.....	78
3.5.1. Australia.....	79
3.5.2. Brasil	80
3.5.3. Estados Unidos de América.....	80
3.5.4. Sudáfrica	81
3.6. Definiciones de etapas de sequía.....	82
3.7. La gestión del riesgo de sequía en México	83
3.7.1. Marco normativo e institucional mexicano.....	83
4. Desarrollo de un Plan de Gestión de Riesgo ante Sequías	93
4.1. Introducción.....	93
4.2. Sistema de indicadores de sequía.....	93
4.2.1. Índices y tipos de sequía.....	93
4.2.2. Escala temporal de análisis	95
4.3. Caracterización de la sequía	95
4.4. Etapas de severidad de sequía.....	96
4.1. Evaluación del riesgo de sequía.....	98
4.1.1. Amenaza	98
4.1.2. Vulnerabilidad.....	98
4.1.3. Riesgo	99
4.2. Medidas de gestión	99
4.2.1. Medidas preventivas (o estratégicas).....	100
4.2.2. Medidas operativas (o tácticas)	100
4.2.3. Medidas organizativas.....	102
4.2.4. Medidas de seguimiento	103
4.2.5. Medidas de restauración (o soluciones de salida de la sequía) ...	104
5. Aplicación de los métodos de evaluación de riesgo y el Plan de Gestión de Riesgo en la cuenca del río Bravo para determinación del riesgo de sequía.....	105
5.1. Introducción.....	105
5.2. Antecedentes.....	106
5.2.1. Zona de estudio	106
5.3. Metodología	108
5.3.1. Función de daño	108
5.3.2. El daño anual esperado (DAE).....	108
5.3.3. Optimización de la distribución del agua	109

5.1. Escenarios	121
5.3.1. Escenario de evaluación del riesgo de sequía.....	122
5.4. Datos y análisis	124
5.4.1. Caracterización de la amenaza.....	124
5.4.2. Modelo de optimización.....	129
5.4.1. Riesgo de sequía sin medidas de gestión (escenario base).....	135
5.4.2. Riesgo de sequía con medidas de gestión.....	140
5.5. Conclusiones	156
A. Análisis de FDC de los afluentes de pago en el T44.....	158
B. Concesiones en la cuenca del Río Bravo	164
C. Modelos mensuales de evaporación por presa.....	169
Enero	169
Febrero.....	170
Marzo	171
Abril.....	172
Mayo	173
Junio	174
Julio	175
Agosto.....	176
Septiembre	177
Octubre	178
Noviembre.....	179
Diciembre	180
Referencias.....	181

Introducción

El estudio que aquí se reporta fue elaborado dentro del marco del Convenio Específico de Colaboración Número 2017-B08-GD-09-RF-AD-A-CC-0001, suscrito entre la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de su Instituto de Ingeniería (II-UNAM). Los capítulos de este informe han sido organizados de modo que cada uno contiene la descripción de las actividades realizadas correspondientes a los distintos conceptos listados en los Términos de Referencia del Convenio citado.

Antecedentes y justificación

Durante los últimos veinte años, las sequías han provocado pérdidas económicas de 5,000 millones de dólares anuales a nivel mundial, y han sumado 1,100 millones de personas afectadas —el 26 % del total de la población afectada por desastres naturales en ese periodo—, a pesar de

representar solo el 5 % de la ocurrencia de desastres naturales¹. En ese periodo, los efectos de la sequía cobraron la vida de 22,000 personas; sin embargo, la cantidad total de víctimas podría ser mucho mayor si se consideran los efectos indirectos (no documentados) de este fenómeno, tales como la desnutrición, las enfermedades y los desplazamientos de población (CRED, 2015).

Prevenir y reducir el riesgo de este tipo de desastres naturales representa una responsabilidad para todos los gobiernos centrales. Sin embargo, la participación de las autoridades locales y los distintos sectores productivos y sociales resulta necesaria para una implementación exitosa de cualquier medida adoptada con este objetivo (UNISDR, 2015).

Ante este escenario resulta indispensable para México contar con los instrumentos técnicos, normativos e institucionales suficientes para hacer frente a la recurrente ocurrencia de este tipo de fenómenos naturales. Por esto, en este estudio se han planteado los siguientes objetivos.

Objetivos

El objetivo general de este estudio es desarrollar un Plan de Gestión de Riesgo ante Sequías, aplicado en la cuenca del río Bravo, mediante la determinación de métodos que cuantifiquen el riesgo de sequía, la frecuencia y el daño estimado provocado por este tipo de eventos con el fin reducir el riesgo de desastres y contribuir al establecimiento de acciones e infraestructura en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos del país.

Fue definida una serie de objetivos particulares que abonan a alcanzar la meta general, misma que se presenta a continuación.

1. llevar a cabo una revisión del estado del arte de las metodologías de cuantificación del riesgo ante sequías;

¹ Las inundaciones son el desastre natural más frecuente, representando el 43 % de los eventos ocurridos en el periodo 1995-2015.

2. llevar a cabo una revisión del estado del arte de los planes de gestión de riesgo ante sequías;
3. seleccionar las metodologías de cuantificación del riesgo cuyas características y productos hagan factible y relevante su implementación en el territorio mexicano; y
4. redactar una propuesta de lineamientos para la gestión del riesgo ante sequías en México y aplicarla en un caso de estudio escogido.

Estructura del documento

El Capítulo 1 contiene la revisión, interpretación y análisis de la información existente en la literatura, con el fin de documentar el estado del arte de los métodos existentes para la evaluación y cuantificación del riesgo de sequía a nivel global. Como resultado, fue seleccionado un conjunto de metodologías cuya aplicabilidad será probada posteriormente en el territorio nacional. Estas actividades corresponden al Concepto 1 de los Términos de Referencia del Convenio, denominado *Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías de evaluación y cuantificación del riesgo ante sequías*.

En el Capítulo 2 se presenta la metodología de evaluación más conveniente para el territorio mexicano, que incluye el uso de indicadores de riesgo que permiten cuantificar su magnitud y realizar el monitoreo espacial y temporal de su comportamiento. El contenido de esta sección corresponde al Concepto 2 del Convenio, denominado *Sintetizar la información necesaria para calcular y proponer métodos de evaluación de riesgo ante sequías para el territorio mexicano, proponiendo indicadores que permitan su estudio, cuantificación y monitoreo en México*.

En el Capítulo 3 se reportan las actividades de recopilación, revisión, interpretación y análisis de la información existente a nivel internacional sobre metodologías y planes de gestión de riesgo ante sequías. Como parte de ésta, fueron documentadas las acciones y recomendaciones pertinentes para ser aplicadas en México en conjunto con la metodología de evaluación y cuantificación de riesgo ante sequías, con el fin de incluir la probabilidad de ocurrencia asociada a los eventos en análisis y los daños estimados en las zonas en riesgo para el territorio mexicano. Esta sección describe el proceso y resultados de las actividades del Concepto 3 del Convenio, denominado

Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías y planes de gestión de riesgo ante sequías a nivel internacional.

En el Capítulo 4 se desarrolla un Plan de Gestión de Riesgo ante Sequías orientado a disminuir el riesgo ante sequías en el territorio mexicano, considerando la variabilidad de cada región en función de su régimen hidrológico y zona climática. Este contenido corresponde a las actividades del Concepto 4 del Convenio, denominado *Desarrollo de un Plan de Gestión de Riesgo ante Sequías*.

Por último, en el Capítulo 5 se describen escenarios de sequía para cuantificar el riesgo mediante la metodología propuesta en la cuenca del Río Bravo. En este capítulo son documentados los métodos, condiciones de frontera, variables y particularidades de la proyección planteada y las recomendaciones sobre medidas de acción y observaciones que deben ser consideradas para aplicar los indicadores que cuantifiquen el riesgo y asimismo, incluir las acciones que disminuyan los daños estimados en las zonas de riesgo en un Plan de Gestión de Riesgo al Reglamento del río Bravo y evaluar la capacidad de disminución del riesgo en el sistema. Esta sección consiste en las actividades llevadas a cabo como parte del Concepto 5 del Convenio, denominado *Aplicación de los métodos de evaluación de riesgo y el Plan de Gestión de Riesgo en la cuenca del río Bravo para determinación del riesgo de sequía*.

1. Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías de evaluación y cuantificación del riesgo ante sequías

1.1. ¿Qué es el riesgo?

Uno de los principales obstáculos que dificultan la práctica de la gestión del riesgo de sequía es la gran variedad de definiciones tanto para los conceptos relativos al riesgo (exposición, sensibilidad, amenaza, vulnerabilidad), como para el mismo fenómeno de la sequía. La dificultad para definir estos conceptos se ve reflejada en la determinación de políticas de gestión de riesgo de sequía (Innocenti, 2014).

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas define al riesgo como “la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas” (UNISDR, 2009). En particular, el *riesgo de sequía* es una propiedad del sistema humano y natural, que refleja la interacción entre el clima, la respuesta hidrológica de la cuenca y la vulnerabilidad de la población, ecosistemas, y economías expuestas a éste (Sayers *et al.*, 2016). Zanuttigh (2014) agregó una precisión

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

a esta definición al indicar que un *desastre* tiene lugar si un evento que representan un alto grado de peligro interactúa con una sociedad vulnerable.

Diversos autores representan la interacción descrita anteriormente mediante un esquema como el de la Figura 1-1, en el que se presentan a la amenaza natural y al sistema vulnerable como las dos componentes del riesgo. La severidad de los daños causados en el sistema dependerá de la magnitud de estos dos elementos. En este capítulo se hará una descripción de dichos elementos y distintos enfoques desde los que han sido abordados.

Existen distintas metodologías para cuantificar al riesgo debido a los distintos objetivos para los que es estimado y el tipo de evento que evalúa. En algunos casos, el riesgo es definido como la probabilidad de que un factor de forzamiento externo exceda la capacidad/resistencia de un sistema, provocando su falla (por ejemplo, Hashimoto *et al.*, 1982; Nicolasi *et al.*, 2007). Desde este enfoque, el riesgo R es calculado como (Tsakiris, 2007):

$$R = 1 - P(X \leq x)^n \quad (1.1)$$



Figura 1-1. Dimensiones del riesgo y algunos de sus componentes (modificado de Wood, 2011).

1.1. ¿QUÉ ES EL RIESGO?

donde $P(X \leq x)$ es la probabilidad acumulada de no excedencia y n es el número de años, suponiendo la estacionariedad e independencia de los eventos extremos.

Otra perspectiva del tema, ampliamente utilizada en los estudios científicos de riesgos naturales, calcula el riesgo R como una relación funcional entre la magnitud de la amenaza analizada H y la vulnerabilidad V del elemento analizado. El ejemplo más simple de este tipo de función es el producto de ambas variables, es decir (Wisner *et al.*, 2003):

$$R = V \times H \quad (1.2)$$

Esta pseudoecuación fue propuesta originalmente por Wisner *et al.* (2003), como base para el modelo *Presión y Alivio* (PAR). La manera más aplicada de este enfoque expresa la vulnerabilidad mediante indicadores normalizados adimensionales. Por ejemplo, Shahid y Behrawan (2008) emplearon el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee *et al.*, 1993) para cuantificar la severidad de la sequía. Además, analizan la amenaza mediante el Índice de Amenaza por Sequía (*Drought Hazard Index, DHI*), calculado como sigue:

$$DHI = (MD_r \times MD_w) + (SD_r \times SD_w) + (VSD_r \times VSD_w) \quad (1.3)$$

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUIÁS

Tabla 1-1. Pesos y calificaciones propuestas por Shahid y Behrawan (2008) para categorizar la sequía en función de los valores del SPI.

Severidad de sequía	Peso	Porcentaje de ocurrencia	Calificación
Moderada	1	[0.0,9.0]	1
		(9.0,10.0]	2
		(10.0,11.0]	3
		(11.0,100.0]	4
Severa	2	[0.0,3.5]	1
		(3.5,4.5]	2
		(4.5,5.5]	3
		(5.5,100.0]	4
Muy severa	3	[0.0,1.5]	1
		(1.5,2.0]	2
		(2.0,2.5]	3
		(2.5,100.0]	4

donde *MD*, *SD* y *VSD* son las siglas de la sequía moderada, sequía severa y sequía muy severa, respectivamente; el subíndice *r* denota a los valores de calificación y los *w* denotan a los valores de peso. Las calificaciones y pesos asignados a cada categoría de severidad y porcentaje de ocurrencia son arbitrarios (ver la Tabla 1-1).

De acuerdo con los valores de los indicadores, se asigna una calificación en el rango 0-1 y se calcula un Índice de Vulnerabilidad ante Sequía (*Drought Vulnerability Index, DVI*), donde *N* es la cantidad de indicadores, como sigue:

$$DVI = \frac{PD_r + FMR_r + PL_r + AO_r + IL_r + SWHC_r + FP_r}{N} \quad (1.4)$$

Conocidos *DHI* y *DVI*, se determina el Índice de Riesgo de Sequía (*Drought Risk Index, DRI*) usando la fórmula siguiente (Downing y Bakker, 2000; Wilhite, 2000; Wisner *et al.*, 2003):

$$DRI = DHI \times DVI \quad (1.5)$$

Nótese la similitud que la ecuación 1.5 tiene con la 1.2. Debido a la relación del *DHI* y el *DVI* en la expresión anterior, si no existe probabilidad de que la amenaza ocurra o no existe vulnerabilidad, el riesgo de sequía para una localidad dada es nulo.

1.1. ¿QUÉ ES EL RIESGO?

Un tercer enfoque considera que el riesgo debe ser cuantificado como la suma de las pérdidas esperadas —en términos monetarios— debidas a un fenómeno natural en particular, como función de la amenaza, la vulnerabilidad y las características del elemento en riesgo (por ejemplo, UNDRO, 1991; van der Pol *et al.*, 2017). Esta concepción tiene la ventaja de presentar al riesgo como un argumento económico, lo que influye positivamente en las políticas de gobernabilidad de los riesgos (Innocenti, 2014).

Tsakiris (2007, 2009) estimó el riesgo promedio anualizado de un elemento en riesgo (R_{ij}) usando la siguiente ecuación:

$$R_{ij} = \sum_1^3 f_k \cdot V_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (1.6)$$

donde f_k es la frecuencia relativa de una sequía de severidad k ; V_{ijk} es la vulnerabilidad del elemento ij frente a una sequía de severidad k ; y x_{ijk} son las consecuencias/pérdidas potenciales del elemento ij en términos cuantitativos (por ejemplo, en unidades monetarias). De esta forma, el daño total anualizado esperado en el sistema R_{total} será la suma de los riesgos anualizados de todos sus elementos, es decir:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \quad (1.7)$$

Este enfoque concibe la vulnerabilidad como un factor que refleja la variación de la magnitud de las consecuencias potenciales derivada de la aplicación de medidas de mitigación de impactos. El proceso crítico para la aplicación de la metodología descrita es la estimación de pérdidas de cada elemento para cada nivel de magnitud de sequía.

Entre los enfoques descritos para cuantificar el riesgo, el modelo PAR es el más empleado en estudios de sequías. Si, además, se toma en cuenta la sencillez de su aplicación, éste emerge como el más adecuado para el análisis del riesgo de sequía en México, como será establecido en la Sección 2 de este Informe.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

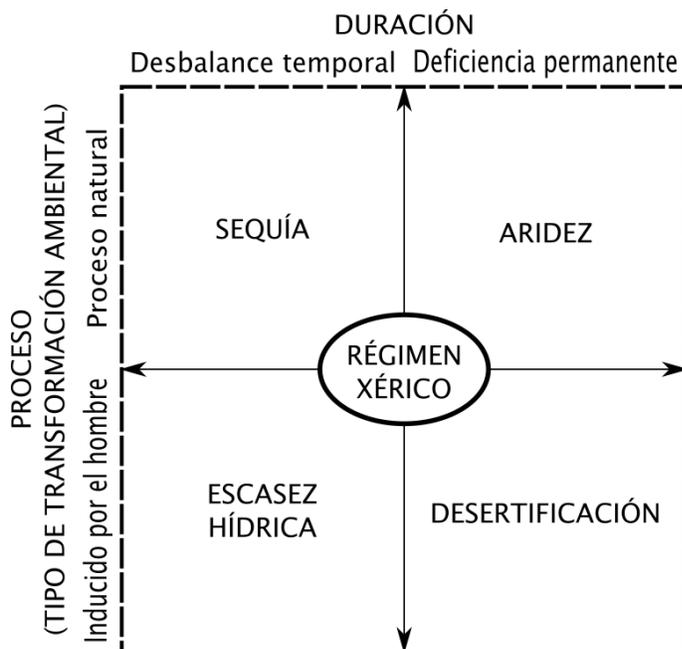


Figura 1-2. Resumen de las categorías de régimen xérico (Hladný y Buchtele, 1989).

1.2. Amenaza

Una *amenaza natural* es “un fenómeno natural que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (UNISDR, 2009).

Específicamente, la *amenaza de sequía* es la combinación de procesos atmosféricos y respuestas hidrológicas que da como resultado una reducción (o pérdida total) del agua en lagos, lagunas, cauces o acuíferos o en el agua almacenada en el suelo y en plantas (Sayers *et al.*, 2016).

Resulta importante diferenciar claramente a la sequía —que es una amenaza natural— de la escasez hídrica, la aridez, y la desertificación —que no son amenazas naturales—. Sus diferencias pueden sintetizarse en dos criterios generales: el proceso que los origina y sus duraciones. La sequía es el único régimen xérico derivado de un proceso natural y que, a la vez, es de carácter temporal (ver la Figura 1-2).

1.2. AMENAZA

El proceso del que se deriva un evento de sequía tiene su inicio en la concentración de grandes masas de aire continental seco sobre una región por un largo periodo debido a la dinámica atmosférica natural. Bajo ciertas condiciones, pueden crearse sistemas anticiclónicos que evitan el movimiento de las masas de aire, obstaculizando la penetración de aire húmedo proveniente de los océanos.

La manifestación inicial de la sequía es un déficit prolongado de precipitación, usualmente acompañado por altas temperaturas en el aire, a lo que se le conoce como *sequía meteorológica*.

La consecuente reducción del contenido de humedad en el suelo provoca un crecimiento de la vegetación más lento e impactos en la calidad y volumen de la producción agrícola, a lo que se le ha llamado *sequía agrícola*.

Las caídas críticas de los niveles de almacenamiento de agua en forma superficial (ríos, presas, etc.) y subsuperficial (zona no saturada) son agrupadas dentro de la clasificación de *sequía hidrológica*.

Los efectos observados en el almacenamiento de agua en la zona saturada del subsuelo son comúnmente separados del resto del sistema hidrológico para su análisis debido a la gran variación en la escala temporal de su respuesta con respecto a las variables superficiales y subsuperficiales, dando origen a la categoría de *sequía hidrogeológica*.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

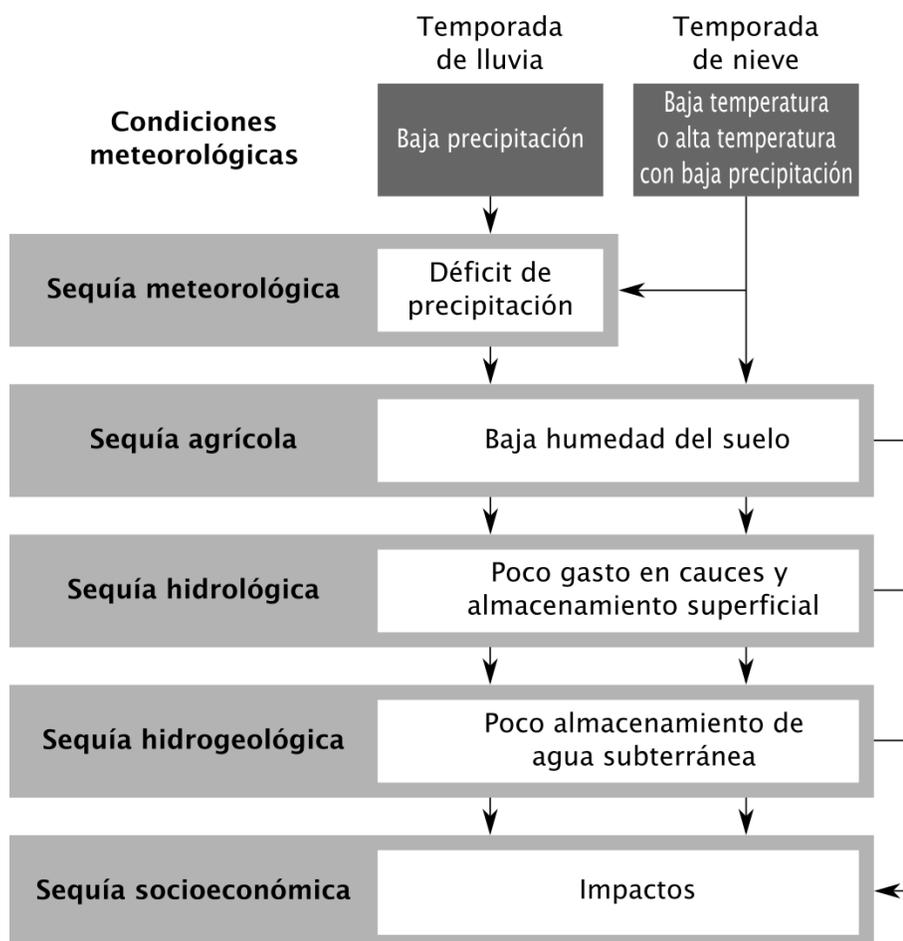


Figura 1-3. Diferentes tipos de sequía y su desarrollo, incluyendo el forzamiento de precipitación y temperatura. Modificado de Van Lanen (2014) y van Loon (2013).

Si uno o más de los distintos tipos de sequía representa algún impacto en la economía y bienestar de una sociedad, se dice que existe una *sequía socioeconómica* (Hladný y Buchtele, 1989; Mishra y Singh, 2010; Wilhite y Glantz, 1985). El proceso en el que estas clasificaciones se suceden es conocido como *propagación de la sequía* y puede ser esquematizado como se muestra en la Figura 1-3.

Una sequía se convierte en un desastre natural cuando el sistema — sociedad, ecosistema acuático o terrestre, etc.— presenta una alta vulnerabilidad como producto de una gestión inadecuada del riesgo de este tipo de eventos (Blauhut *et al.*, 2016; Wilhite, 2000). Las consecuencias de un desastre natural de este tipo pueden incluir serias interrupciones en el

funcionamiento de una sociedad, una gran cantidad de muertes, pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que excedan la capacidad de la comunidad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (UNISDR, 2009).

Un evento de sequía puede ser descrito en función de su severidad, mediante un análisis de frecuencia con ayuda de algún índice de sequía —o una combinación de distintos índices—. Este enfoque evalúa la amenaza de sequía dh para una región i como la probabilidad de excedencia de ciertos umbrales predefinidos para una variable —o una combinación de variables— con una expresión como la siguiente (Carrão *et al.*, 2016):

$$dh_i = 1 - P(S_i \leq \tilde{S}) \quad (1.8)$$

donde S_i representa el conjunto ordenado de valores de déficit de una variable asociada a la sequía (por ejemplo, precipitación, escurrimiento, humedad del suelo, etc.) en la región i ; y \tilde{S} representa el umbral de déficit.

1.2.1. Índices e indicadores de sequía

La forma más común para evaluar la severidad de un evento de sequías es a través de indicadores e índices de sequía (Tsakiris *et al.*, 2007). Los *indicadores de sequía* son parámetros utilizados para describir las variaciones respecto al comportamiento normal de las variables involucradas (WMO y GWP, 2016). Por su parte, los *índices de sequía* son valores numéricos que sirven de referencia para evaluar la severidad del periodo seco. Estos índices representan una importante herramienta para la toma de decisiones, y se estiman a través de variables meteorológicas (*e. g.*, precipitación, cobertura nubosa) e hidrológicas (*e. g.*, flujo en cauces, profundidad del nivel freático, almacenamiento en cuerpos de agua), entre otras.

El uso de índices e indicadores de sequía hace posible llevar a cabo actividades elementales para la gobernanza del riesgo de sequía, tales como (Zargar *et al.*, 2011):

- detección de sequías y monitorización en tiempo real;
- determinación del inicio y final de un periodo de sequía;

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUIÁS

- justificación objetiva de la activación de medidas de respuesta ante estos eventos;
- análisis comparativo de los impactos cuantitativos de varios eventos a diferentes escalas espaciales y temporales; y
- comunicación pública eficaz de las condiciones de sequía.

Cada proceso demandante de agua (físico, biológico, social, industrial, etc.), que tiene lugar dentro de una región dada, presenta requerimientos particulares de acceso y calidad del líquido (Lloyd-Hughes, 2014). Esto da pie a tantas definiciones para la sequía como procesos demandantes de agua existan. Así, la literatura reporta una gran cantidad de formulaciones para cuantificar la ocurrencia y severidad de un evento —(Niemeyer, 2008) identificó 80 distintos índices de sequía—.

Los primeros índices de sequía desarrollados —a partir de la década de 1960— basaban sus cálculos en las variables registradas por estaciones meteorológicas sinópticas (Niemeyer, 2008), de ahí que es común encontrarlos referidos en la literatura como *índices meteorológicos*. La Tabla 1-2 contiene una síntesis de los índices de sequía meteorológica más aplicados a nivel mundial.

Tabla 1-2. Indicadores e índices de sequía meteorológica. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Índice de Anomalía de Aridez (AAI)	ET, P, PET, T	Disponible operativamente para India.
Deciles	P	Fácil de calcular.
Índice de Sequía Keetch-Byram (KBDI)	P, T	El cálculo está basado en el clima del área de interés.
Porcentaje de la precipitación normal	P	Cálculo simple.
Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	P	Destacado por la Organización Meteorológica Mundial como punto de partida para monitorizar la sequía meteorológica.

1.2. AMENAZA

Tabla 1-2. Indicadores e índices de sequía meteorológica. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Anomalía Ponderada de la Precipitación Estandarizada (WASP)	P, T	Utiliza datos mallados para monitorizar la sequía en regiones tropicales.
Índice de Aridez (AI)	P, T	Puede ser usado, también, en la clasificación de climas.
Índice Z de China (CZI)	P	Creado para mejorar datos derivados del SPI.
Índice de Humedad de Cultivo (CMI)	P, T	Requiere información semanal.
Índice del Área de Sequía (DAI)	P	Indicador del desarrollo de la temporada de monzón.
Índice de Reconocimiento de Sequía (DRI)	P, T	Requiere datos mensuales de temperatura y precipitación.
Índice de Sequía Efectiva (EDI)	P	Programa disponible a través de su autor.
Coficiente hidrotermal de Selyaninov (HTC)	P, T	Cálculo sencillo.
Índice de Sequía NOAA	P	Recomendado para aplicaciones agrícolas.
Índice Palmer de Severidad de Sequía (PDSI)	AWC, P, T	Cálculo complejo. Requiere series de datos completos.
Índice Z Palmer	AWC, P, T	Es uno de los muchos datos de salida del PDSI.
Índice de Anomalía de la Lluvia (RAI)	P	Requiere series de datos completos.
Índice Palmer de Severidad de Sequía autocalibrado (sc-PDSI)	AWC, P, T	Cálculo complejo. Requiere series de datos completos.
Índice de Anomalía Estandarizada (SAI)	P	Usa datos puntuales para describir condiciones regionales.
Índice Estandarizado de Precipitación Evapotranspiración (SPEI)	P, T	Requiere series de datos completos. Sus resultados son similares al SPI pero con una componente de temperatura.
Índice Agrícola de Referencia para la Sequía (ARID)	Mod, P, T	Producido en el sureste de E.U.A. No ha sido probado ampliamente fuera de dicha región.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUIÁS

Tabla 1-2. Indicadores e índices de sequía meteorológica. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Índice de Sequía de Cultivo Específico (CSDI)	AWC, CD, Mod, P, Rad, T, Td, W	Requiere datos de alta calidad de muchas variables.
Índice de Sequía de Recuperación (RDI)	P, RD, S, SF, T	Es similar al Índice de Abastecimiento de Agua Superficial, pero contiene una componente de temperatura.

AWC: contenido de agua disponible; ET: evapotranspiración; Mod: resultados de modelo; P: precipitación; PET: evapotranspiración potencial; Rad: radiación solar; RD: embalse; S: nieve acumulada; Sat: datos de satélite; SF: flujo en cauces; ST: tipo de suelo; SWD: déficit de agua del suelo; T: temperatura; Td: temperatura de rocío; W: datos de viento.

Posterior al nacimiento de los índices de sequía meteorológica, y a la luz de su gran utilidad, surgió una serie de investigaciones que propusieron índices para evaluar, de manera específica, la sequía agrícola. Entre los primeros se cuenta al Índice de Humedad de Cultivo (CMI; Palmer, 1968). Una breve lista de índices empleados comúnmente para definir a la sequía agrícola se presenta en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Indicadores e índices de sequía de humedad del suelo (agrícola). Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Anomalía de Humedad del Suelo (SMA)	AWC, P, T	Creado para mejorar el balance de agua del PDSI.
Índice de Déficit de Evapotranspiración (ETDI)	Mod	De cálculo complejo y requiere múltiples datos de entrada.
Índice de Déficit de Humedad del Suelo (SMDI)	Mod	Cálculos semanales a distintas profundidades del suelo; de cálculo complejo.
Almacenamiento de Agua en el Suelo (SWS)	AWC, RD, ST, SWD	Debido a la variación de los tipos de suelo y cultivo, interpolar su valor en regiones extensas representa un reto.

AWC: contenido de agua disponible; Mod: resultados de modelo; P: precipitación; RD: embalse; ST: tipo de suelo; SWD: déficit de agua del suelo; T: temperatura.

Otra clase de índices de sequía existe para caracterizar los efectos del déficit en el sistema hidrológico. Con este objetivo, existen índices como el Q90 o el

1.2. AMENAZA

Índice de Flujo Base (Institute of Hydrology, 1980). La Tabla 1-4 contiene índices de sequía basados en indicadores hidrológicos, con los que se estima la sequía hidrológica.

Tabla 1-4. Indicadores e índices de sequía hidrológicos. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI)	AWC, P, T	Requiere series de datos completos.
Índice Estandarizado de Abastecimiento a Embalse (SRSI)	RD	Cálculo similar al SPI, usando datos de almacenamiento en embalse.
Índice Estandarizado de Flujo en Cauces (SSFI)	SF	Cálculo similar al SPI, usando datos de flujo en cauces.
Índice Estandarizado de Nivel de Agua (SWI)	GW	Cálculo similar al SPI, usando datos de profundidad del nivel del agua subterránea.
Índice de Abastecimiento de Agua Superficial (SWSI)	P, RD, S, SF	Tiene varias metodologías y productos derivados.
Índice de Sequedad Agregada (ADI)	AWC, ET, P, RD, S, SF	No existe un programa que lo calcule pero sus bases matemáticas son descritas en la literatura.
Índice Estandarizado de Deshielo y Lluvia (SMRI)	Mod, P, T, SF	Puede ser aplicado con o sin información de la nieve acumulada.

AWC: contenido de agua disponible; ET: evapotranspiración; GW: agua subterránea; Mod: resultados de modelo; P: precipitación; RD: embalse; S: nieve acumulada; SF: flujo en cauces; T: temperatura.

El desarrollo de los satélites de observación terrestre en los últimos 30 años ha permitido la monitorización y detección de sequías desde un enfoque totalmente nuevo. Estas tecnologías permitieron obtener información espacial a nivel global basada en métodos consistentes y con escalas temporales de alta resolución. En su mayoría, estas fuentes de información permitieron desarrollar índices de las condiciones de la vegetación en la superficie terrestre, que pueden ser interpretadas como anomalías en la humedad disponible. La Tabla 1-5 contiene una breve lista de los índices de percepción remota más empleados.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUIÁS

Tabla 1-5. Indicadores e índices de sequía de percepción remota. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Índice de Vegetación Mejorado (EVI)	Sat	No separa al estrés por sequía de otras fuentes de estrés.
Índice de Estrés Evaporativo (ESI)	PET, Sat	Ha sido poco aplicado de manera operativa.
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Sat	Es calculado para casi todo el planeta.
Índice de Condiciones de Temperatura (TCI)	Sat	Usualmente, es calculado junto con el NDVI.
Índice de Condición de Vegetación (VCI)	Sat	Usualmente, es calculado junto con el NDVI.
Índice de Respuesta de la Vegetación a la Sequía (VegDRI)	AWC, ER, LC, P, Sat, T	Toma en cuenta muchas variables para separar el estrés por sequía de otras fuentes de estrés.
Índice de Salud de la Vegetación (VHI)	Sat	Es uno de los primeros intentos de monitorizar a la sequía usando datos derivados de sensores remotos.
Índice de Satisfacción del Requerimiento de Agua (WRSI y WRSI Geoespacial)	CC, Sat, Mod	Es usado operacionalmente en distintos lugares.
Índice de la Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) e Índice de Agua de Superficie Terrestre (LSWI)	Sat	Son producidos operacionalmente usando datos del Espectrorradiómetro de Formación de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS)

AWC: contenido de agua disponible; CC: coeficiente de cultivo; ER: Ecorregión; LC: cobertura del suelo; Mod: resultados de modelo; P: precipitación; PET: Evapotranspiración Potencial; Sat: datos de satélite; T: temperatura.

Durante los últimos 20 años han surgido diversos índices de sequía que incorporan múltiples fuentes de información. Estos tipos de índices combinan típicamente datos meteorológicos con información de la superficie terrestre derivada de percepción remota. La Tabla 1-6 presenta dos de los índices más representativos de este tipo.

1.2. AMENAZA

Tabla 1-6. Indicadores e índices de sequía compuestos o modelados. Fuente: (WMO y GWP, 2016).

Nombre	Parámetros de entrada	Descripción
Indicador de Sequía Combinado (CDI)	Mod, P, Sat	Usa datos de observación directa y de percepción remota.
Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI)	Múltiple, Mod	Su interpretación sigue en desarrollo.

Mod: resultados de modelo; Múltiple: múltiples indicadores son usados; P: precipitación; Sat: datos de satélite.

Los índices de sequía pueden ser aplicados con distintas fuentes de información para evaluar la ocurrencia de una sequía. Entre éstas se encuentran las observaciones directas (lluvia, escurrimiento, etc.); los datos aproximados (como la interpretación de anillos de árboles, núcleos de hielo, polen, etc.); modelos climáticos estocásticos acoplados con conceptos basados en la física, como el balance de agua; y modelos de circulación global reescalados. La elección del índice o conjunto de índices y las fuentes de información usadas en la evaluación de la sequía dependerá, principalmente, del proceso que se desea estudiar, y la información y capacidad de cómputo disponibles.

Los índices estandarizados de sequía

Los índices estandarizados de sequía (IES) son de particular interés para este estudio, ya que, al estar basados en un análisis probabilístico, resultan adecuados para su implementación en la gestión del riesgo.

Los IES parten de la definición de sequía propuesta por McKee *et al.* (1993), que consiste en la normalización de los registros de una variable asociada con la sequía usando una distribución de probabilidad, de modo que los resultados son interpretados como la desviación de cada registro con respecto a su mediana, en términos de la desviación estándar.

Esta metodología presenta una serie de ventajas. Por ejemplo, la sencillez de su aplicación con distintas escalas temporales y con pocas variables necesarias y la posibilidad de estimar periodos de déficit y de exceso en un mismo indicador. Además, la acumulación de sus valores durante un evento puede ser usada para analizar su magnitud.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

Los IES son derivados mediante el ajuste de una función de distribución de probabilidad a los datos de una variable asociada con la sequía. La metodología original propuso la aplicación de la función gamma de dos parámetros; sin embargo, estudios posteriores han encontrado buenos resultados con otras funciones (por ejemplo, Angelidis *et al.*, 2012). Una vez obtenido el valor de la probabilidad, el IES se determina como sigue:

$$IES = \phi^{-1}(p) \quad (1.9)$$

donde ϕ es la función de distribución normal estándar, y p es la probabilidad acumulada correspondiente a cada registro. Una secuencia de IES positivos indica un periodo húmedo, y una secuencia de valores negativos representa a un periodo seco.

Farahmand & AghaKouchak (2015) demostraron que es posible obtener la probabilidad acumulada empleando una ecuación empírica basada en posiciones y obtener resultados sensiblemente similares a los derivados del ajuste de una función teórica. La mayoría de las fórmulas empíricas basadas en posiciones para estimar la probabilidad tienen la forma general siguiente:

$$p = \frac{i - a}{n + 1 - 2a} \quad (1.10)$$

donde n es el tamaño de la muestra, i denota la posición de cada registro en orden ascendente, p es la probabilidad empírica correspondiente y a varía entre 0.0 y 0.5 (Helsel y Hirsch, 2002).

Diversos estudios han propuesto valores para el término a para distintas aplicaciones (por ejemplo, Blom, 1958; Cunnane, 1978; Hazen, 1913; Weibull, 1939); sin embargo, en el análisis de series de tiempo extensas, como es el caso en el estudio de sequías, las distintas técnicas empíricas resultan en valores similares (Turnbull, 1976). A reserva de la justificación de un valor de a derivada de un estudio *ex profeso*, es aceptable la adopción del valor $a = 0.44$, propuesto por Gringorten (1963).

De esta metodología se desprenden índices para distintas variables climatológicas e hidrológicas, como la precipitación (SPI; McKee *et al.*, 1993), la humedad del suelo (SSI; Hao y AghaKouchak, 2013) y el escurrimiento (SRI; Shukla y Wood, 2008).

La Organización Mundial Meteorológica ha propuesto una interpretación para las escalas temporales del SPI. Por ejemplo, una escala temporal de 3 meses sirve como indicador de humedad del suelo, el 6 meses puede ser asociado con anómalas en flujos en cauces naturales y niveles en embalses y 12 meses sugiere efectos en cauces, almacenamientos e, incluso, en los niveles de acuíferos (WMO, 2012).

Desde este enfoque, la aplicación de escalas temporales al cálculo del SPI funge como un filtro numérico que modula una señal de entrada (serie temporal de precipitación) para generar una señal de salida con un efecto acumulativo de la información de entrada y desfasada en el tiempo (asociada al comportamiento de la humedad del suelo o el escurrimiento). A través de este "filtro" es posible simular con relativa eficiencia la propagación de la sequía en el sistema hidrológico. Sin embargo, esta interpretación puede perder validez en distintas regiones e, incluso, en distintas estaciones del año dentro de la misma región (Shukla y Wood, 2008). Además, el uso de integraciones temporales acumula valores que pueden no tener influencia en las condiciones actuales del proceso hidrológico y provocar un efecto de retraso en el inicio o terminación de un periodo seco (o húmedo) en la serie temporal del índice estandarizado (Shukla y Wood, 2008).

La determinación de la *magnitud* de la sequía hace posible comparar los impactos ocurridos (registro histórico) o esperados (pronóstico) durante distintos eventos, así como asignarles una frecuencia. La magnitud de un periodo seco puede ser definida como el área comprendida entre la serie temporal del IES y el eje que representa a las condiciones "normales", dividida entre un valor de IES de referencia. Analíticamente, es expresada como sigue:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n IES_i}{IES_{ref}} \quad (1.11)$$

donde i y n son el primer y último paso de tiempo consecutivo con $IES < 0$. M equivale al número de meses que duraría el periodo seco estudiado si todos los pasos de tiempo presentaran una intensidad IES_{ref} (McKee *et al.*, 1993).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

El Índice Estandarizado de Sequía Multivariado

El uso de un solo indicador de sequía puede ser insuficiente para describir todas las etapas de una sequía (AghaKouchak, 2015; Dracup *et al.*, 1980; Hao y AghaKouchak, 2013; Kao y Govindaraju, 2010). El análisis combinado del déficit de dos (o más) variables hidrológicas distintas (por ejemplo, precipitación y humedad del suelo) permite identificar diversos aspectos de un mismo evento (por ejemplo, inicio y persistencia).

Con esto en mente, Hao y AghaKouchak (2013, 2014) propusieron extender la metodología de los IES para combinar la información obtenida de múltiples variables relacionadas con la sequía usando la distribución de probabilidad acumulada conjunta de las variables, creando el Índice Estandarizado de Sequía Multivariado (MSDI). Una vez que se conoce la probabilidad conjunta acumulada p , el MSDI puede ser definido con la ecuación 1.9. De forma similar a la definición de los IES, una secuencia de valores negativos indica sequía, mientras que una secuencia de valores positivos representa una condición climática húmeda. Valores del MSDI cercanos a cero indican condiciones normales de humedad.

Existen diversas técnicas estadísticas para estimar la probabilidad de cada registro. Una simplificación válida de este proceso consiste en aplicar una fórmula empírica multivariada —análoga a la metodología descrita para el análisis univariado—. La probabilidad empírica puede ser derivada usando el modelo multivariado de Gringorten (Yue *et al.*, 1999), mediante la siguiente expresión:

$$P(X \leq x_i, Y \leq y_i) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml} - 0.44}{n + 0.12} \quad (1.12)$$

Donde n es el tamaño de la muestra y $\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml}$ representa al número de conjuntos de observaciones (pares, triadas, etc.) en los que $X \leq x_i$ y $Y \leq y_i$.

Además de mejorar la identificación de las distintas fases de un evento, el análisis conjunto de la probabilidad de múltiples variables tiene dos implicaciones principales al momento de evaluar la severidad de las sequías (Hao y AghaKouchak, 2013):

- i. El MSDI es capaz de identificar una sequía, aun cuando las distintas variables analizadas presenten valores cercanos a un umbral de alerta

1.2. AMENAZA

Tabla 1-7. Categorías de severidad de sequía usadas en el *U. S. Drought Monitor* (modificado de Svoboda *et al.*, 2002).

Categoría	Condición	Valores asociados de IES	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
D0	Anormalmente seco	$-0.5 \geq IES > -0.8$	20-30 %	3.3
D1	Sequía (Moderada)	$-0.8 \geq IES > -1.3$	10-20 %	5
D2	Sequía (Severa)	$-1.3 \geq IES > -1.6$	5-10 %	10
D3	Sequía (Extrema)	$-1.6 \geq IES > -2.0$	2-5 %	20
D4	Sequía (Excepcional)	$IES \leq -2.0$	≤ 2 %	50

definido, pero sin alcanzarlo. Esto se debe a que la probabilidad conjunta tiene un mayor espacio probabilístico que la probabilidad marginal de cada una de las variables.

- ii. El MSDI otorgara un mayor grado de severidad a las condiciones de sequía que si fueran estas analizadas por separado (por ejemplo, mediante el SPI, SSI, etc.). Esto es un reflejo de la excepcionalidad de observar simultáneamente valores críticos en más de un indicador.

1.2.2. Umbrales de severidad

Los umbrales son valores específicos de un indicador o índice que sirven para identificar objetivamente el inicio o final de las distintas etapas de un plan de atención a la sequía y las medidas de mitigación y atención a emergencias asociadas a éste (WMO y GWP, 2016).

Una lista de umbrales de severidad es válida exclusivamente para la región para la que fue diseñada dado que es derivada del análisis de impactos de sequías registradas en dicha localización; no obstante, la información necesaria para su determinación es escasa en muchas regiones del mundo. Además, delimitar el alcance espacial y temporal de los impactos de una sequía es complejo debido a su naturaleza gradual y a que sus consecuencias suelen reflejarse junto con la influencia de otros factores ajenos al fenómeno climatológico.

Ante la falta de un análisis de impactos socioeconómicos, los umbrales de severidad pueden ser asociados a probabilidades de ocurrencia —o periodos de retorno— convencionalmente empleados en los estudios de frecuencia de eventos hidrológicos extremos (por ejemplo, 2, 5, 10, 20, 50 años, etc.). La

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

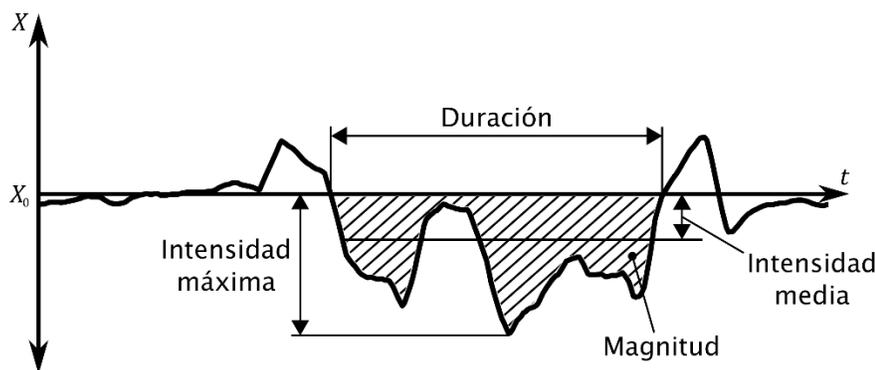


Figura 1-4. Rasgos temporales de un evento de sequía en función de un indicador de intensidad X y un valor umbral X_0 .

Tabla 1-7 muestra una lista de umbrales de severidad propuesta para Estados Unidos por Svoboda *et al.* (2002) acorde a este criterio.

1.2.3. Análisis de frecuencia

El concepto de *frecuencia*, aplicado a las variables asociadas con la sequía, es interpretado como la cantidad de ocasiones en que un umbral de severidad es alcanzado en una región geográfica y un periodo de tiempo dados (Carrão *et al.*, 2014). En este sentido, la severidad de un evento de sequía puede ser evaluada en función de diversos rasgos. Por ejemplo, su duración, su magnitud, intensidad máxima e intensidad media (ver la Figura 1-4).

Algunos estudios han propuesto la evaluación de la severidad de la sequía analizando múltiples rasgos de forma conjunta (por ejemplo, Andreadis *et al.*, 2005; Halwatura *et al.*, 2015). Este enfoque cobra especial relevancia en análisis de zonas áridas y semiáridas, en las que, debido a la presencia normal de prolongados periodos sin precipitación, la magnitud de la sequía no logra reflejar completamente su severidad y es necesario considerar, además, su duración (Wu *et al.*, 2007).

Si se cuenta con un indicador de serie temporal de severidad anual de sequía, el procedimiento sigue una metodología típica del análisis de frecuencia de eventos extremos. Sin embargo, dado que es relativamente común encontrar sequías con duraciones mayores a un año, las características de los eventos pueden ser analizadas como series de duración parcial de eventos independientes. La distribución de probabilidad de series

de duración parcial de eventos independientes debe ser convertida a una distribución de probabilidad equivalente para una serie de excedencia anual usando los métodos del ‘pico sobre un umbral’ o de ‘series de duración parcial’. Si la distribución de probabilidad acumulada marginal de duración de sequía, d , para un nivel umbral dado, es denotada por $F_D(d)$, su periodo de retorno, T_d , expresado en años, es definido por la siguiente expresión (Kim *et al.*, 2003):

$$T_d = \frac{1}{\theta[1 - F_D(d)]} \quad (1.13)$$

donde $\theta = n/N$; N es la longitud total (expresada en años) de elementos en la serie temporal del indicador de sequía; y n es el número total de eventos de sequía, d , durante N .

El periodo de retorno bivariado de sequías puede ser estimado sustituyendo la función de distribución de probabilidad univariada acumulada por la función de distribución de probabilidad bivariada acumulada. Por ejemplo, los periodos de retorno de duración, d , y magnitud, m , de sequía están dados por la ecuación siguiente:

$$T_{d,m} = \frac{1}{\theta[1 - F_{D,M}(d, m)]} \quad (1.14)$$

donde $T_{d,m}$ es el periodo de retorno conjunto de la duración y magnitud de sequía, y $F_{D,M}(d, m)[= P(D \leq d, M \leq m)]$ es la distribución de probabilidad conjunta acumulada de duración y magnitud de sequía.

1.3. Vulnerabilidad

Los esfuerzos para reducir los impactos de la sequía están, generalmente orientados a la mitigación de la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales (Poljanšek *et al.*, 2017). Esto se debe, en gran medida, a que la vulnerabilidad de una sociedad puede ser disminuida a través de diversas medidas que forman parte del enfoque de la gestión del riesgo, mientras que la influencia que el hombre ejerce en la ocurrencia de amenazas naturales es limitada. Este subcapítulo presenta el marco conceptual y metodológico indispensable para la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema frente a un evento de sequía.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

La vulnerabilidad describe el grado en el que un sistema socioeconómico o un bien físico es susceptible o resiliente al impacto de una variedad de perturbaciones dañinas, tomando en cuenta sus características ambientales, sociales, económicas y políticas (Bohle *et al.*, 1994; Wilhelmi y Wilhite, 2002). Algunos elementos que aumentan la vulnerabilidad de una comunidad son, por ejemplo, el diseño inadecuado y la construcción deficiente de la infraestructura, la protección inadecuada de los bienes, la falta de información y de concientización pública, un reconocimiento oficial limitado del riesgo y de las medidas de preparación y la desatención a una gestión ambiental sensata y prudente (UNISDR, 2009).

El nivel de vulnerabilidad es independiente del tipo de amenaza, dado que representa un atributo propio del sistema social y es válido para un lugar únicamente en el contexto de la población que lo ocupa. Por tal motivo, puede variar desde una condición de crisis extrema hasta otra de total seguridad (o viceversa) en un lapso de unos cuantos meses o, incluso, días.

Diversos autores caracterizan a la vulnerabilidad ante sequías siguiendo la definición que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) propuso en su Tercer Informe de Evaluación. Según ésta, la vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y tasa de incremento de la amenaza a la que un sistema se ve expuesto, además de su sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2001). Esta definición ha conducido a una concepción de la *exposición* como “la extensión espacial, duración o frecuencia de una fuente de estrés —en este caso, el déficit de agua— en un sistema”, lo que coincide con la definición de la *amenaza* (véase, por ejemplo, Adger, 2006; Assimacopoulos *et al.*, 2014; Brooks *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2013; Smit y Wandel, 2006). En su Quinto Reporte de Evaluación, el IPCC modificó la concepción de estos términos, dejando a la vulnerabilidad en función de la sensibilidad la capacidad de hacer frente y adaptarse de un sistema (IPCC, 2014).

Con el objetivo de evitar la redundancia de conceptos, en este estudio se consideran que la vulnerabilidad está compuesta por tres elementos: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, definidos como sigue:

Exposición

La presencia de personas, medios de sustento, especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; bienes infraestructurales,

económicos, sociales o culturales en sitios y con arreglos tales que pueden verse adversamente afectados.

Sensibilidad

Es el grado al que se ve afectado un sistema debido a una sequía (como resultado de factores sociales, económicos y tecnológicos).

Capacidad de adaptación

Es la habilidad del sistema para hacer frente a un estrés, incluyendo su habilidad para activar medidas para prevenir futuros daños y/o para ampliar el rango de condiciones a las que está adaptado.

El estudio de la vulnerabilidad basado únicamente en la capacidad de adaptación del sistema carece de sentido, a menos de que el sistema se vea expuesto a la amenaza. Su grado de exposición y sensibilidad pueden ser medidos en función de la cantidad de personas o los tipos de bienes en una zona.

En términos matemáticos, la vulnerabilidad de un sistema puede ser expresada como una función de su *exposición*, E , su *sensibilidad*, S , y su *capacidad de adaptación*, AC . Es decir:

$$V = f(E, S, AC) \quad (1.15)$$

Algunos autores (por ejemplo, Tsakiris, 2007) incluyen a esta función la *magnitud* M del evento y las interrelaciones entre los *factores internos* I del sistema. Sin embargo, estas variables podrían ser consideradas dentro del análisis de la amenaza o del resto de las dimensiones de la vulnerabilidad definidas anteriormente.

Con el objetivo de emplear dicha función como parte de un estudio de evaluación del riesgo, sus resultados deben adquirir valores entre 0 y 1, donde 1 significa que el sistema se encuentra totalmente desprotegido ante la ocurrencia de una amenaza, mientras que un valor cercano a 0 corresponde a sistemas bien protegidos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

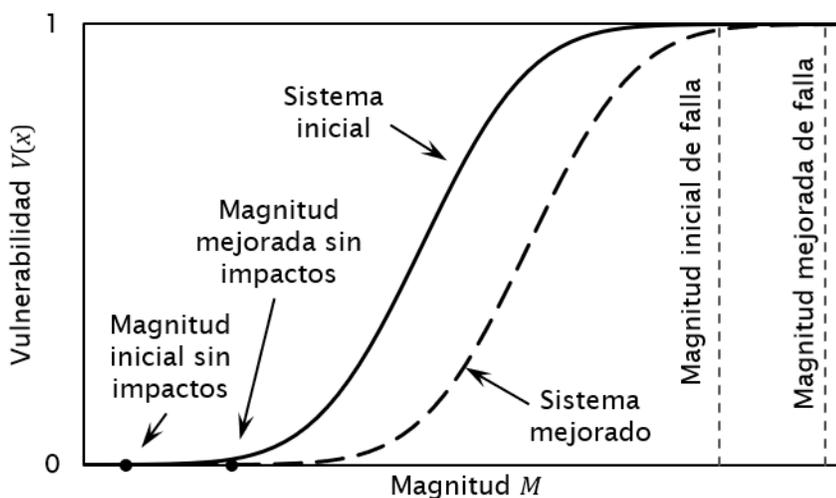


Figura 1-5. Vulnerabilidad de un sistema como función únicamente de la magnitud de la amenaza (Tsakiris, 2007).

La Figura 1-5 presenta una función de vulnerabilidad en función de la magnitud del estrés al que el sistema es sometido. En ésta se observa que al mejorar la resistencia del sistema, la curva de vulnerabilidad es trasladada hacia la derecha, lo que se interpreta como un grado inferior de vulnerabilidad ante la misma magnitud del evento, una vez que el sistema ha sido mejorado.

Una reducción de la susceptibilidad al daño, como la esquematizada en la Figura 1-5, puede ser alcanzada a través de estrategias tales como (Tsakiris, 2007):

1. Mitigar la magnitud del fenómeno.
2. Mejorar la capacidad de control del sistema, a través de:
 - a. el mejoramiento de las condiciones internas del sistema;
 - b. el mejoramiento de las capacidades sociales de hacer frente al fenómeno;
 - c. el control de los factores internos y sus interrelaciones.
3. Reducir la sensibilidad del sistema al fenómeno que representa una amenaza.

1.3. VULNERABILIDAD

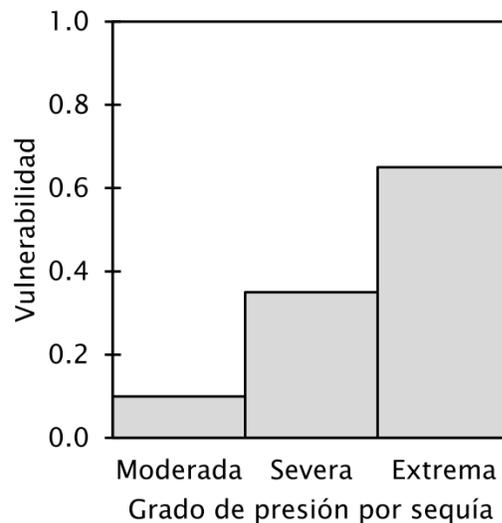


Figura 1-6. Función escalonada de vulnerabilidad típica de un sistema (Tsakiris, 2017).

Resulta interesante que, debido a los avances en la gestión de los desastres naturales, en gran parte del mundo existe una tendencia a la baja en el grado de vulnerabilidad a la pérdida de vidas asociada con este tipo de amenazas. En contraste, la vulnerabilidad económica se incrementa rápidamente en muchos países desarrollados al ritmo en que el ingreso per cápita aumenta (Downing y Bakker, 2000).

La Figura 1-6 muestra una representación simplificada de la función de vulnerabilidad de un sistema que caracteriza la amenaza en función de tres grados de presión: S_1 (moderada), S_2 (severa) y S_3 (extrema). La vulnerabilidad es determinada a través de la frecuencia de cada categoría de grado de presión mediante un análisis de frecuencias de sequías anuales.

Mediante esta metodología, es posible asignar valores de vulnerabilidad V_{ijk} a cada elemento i de cada subsistema j sujeto a la ocurrencia de una amenaza de grado k . Tsakiris (2017) otorgó un valor entre 0 y 1 a la vulnerabilidad de cada combinación ijk , 0 representando a un elemento completamente protegido y 1, a un elemento totalmente desprotegido ante la ocurrencia de una amenaza.

1.3.1. Índice compuesto de vulnerabilidad

El enfoque más usado para cuantificar la vulnerabilidad de un sistema como parte de la evaluación del riesgo de sequía es la construcción de índices compuestos (González Tánago *et al.*, 2016). Este enfoque permite resumir la complejidad y multidimensionalidad de la vulnerabilidad, es más simple su interpretación que el análisis de diversos indicadores por separado, y facilita la comunicación de las condiciones de vulnerabilidad a los tomadores de decisiones y al público en general.

Entre los mayores retos dentro de la evaluación de la vulnerabilidad, se encuentra la selección de indicadores y metodologías seguidas para su normalización, asignación de pesos y agregación (Carrão y Barbosa, 2015; Wiréhn *et al.*, 2015). A continuación, serán revisadas cada una de estas etapas del proceso.

Selección de indicadores

Dada la complejidad de los sistemas humanos, que cuentan con diversas características físicas, sociales, económicas, políticas y ambientales, entre otras, la evaluación de la vulnerabilidad requiere la reducción de la información disponible a un conjunto de indicadores numéricos que faciliten su estimación. Estos indicadores deben ser capaces de reflejar el grado en el que un sistema es susceptible o resiliente al impacto de una sequía.

La selección de indicadores puede ser llevada a cabo mediante un enfoque *deductivo* o uno *inductivo*. El enfoque deductivo se basa en la asociación de diversos indicadores con el fenómeno de la sequía y sus procesos partiendo de un marco teórico. Por otro lado, el enfoque inductivo hace uso de procedimientos estadísticos para relacionar un gran número de variables con la vulnerabilidad ante sequías con el objetivo de identificar los factores estadísticamente significativos.

CRITERIOS DE SELECCIÓN

Sea cual sea el enfoque para la selección de indicadores, existe una serie de criterios que ayudan a discriminar aquellos indicadores que son valiosos para un análisis de aquellos que no lo son. Damm (2009) clasificó los criterios en tres grupos: consideraciones técnicas, consideraciones metodológicas y consideraciones prácticas. A continuación, se hace una

relación de los criterios de selección que deben ser considerados para el análisis de la vulnerabilidad ante sequías mediante indicadores.

- Consideraciones técnicas
 - Validez/Precisión
El indicador debe ofrecer un reflejo fiel de la vulnerabilidad ante sequías y ser desarrollado dentro de un marco de trabajo analítico consistente. Debe recopilar y usar datos verificables y científicamente aceptables, que usen metodologías estándar con precisión conocida.
 - Relevancia
El indicador debe estar relacionado con la vulnerabilidad ante sequías y los objetivos de su análisis de una manera clara.
 - Reproducibilidad
El indicador debe ser reproducible y verificable.
 - Sensibilidad
El indicador debe responder a un rango amplio de condiciones o perturbaciones dentro de unas escalas temporal y espacial aceptables.
 - Transparencia
La metodología y criterios para el cálculo del indicador deben ser, idealmente, públicos y de fácil consulta.
- Consideraciones metodológicas
 - Comprensibilidad
El indicador debe ser de fácil comprensión por parte de sus usuarios.
 - Facilidad de interpretación
La interpretación de los datos debe ser simple y atractiva para el público. El indicador debe informar claramente acerca del grado de vulnerabilidad.
- Consideraciones prácticas
 - Disponibilidad de los datos
Los datos deben ser de fácil disponibilidad para los usuarios u ofrecer la posibilidad de ser medidos.
 - De costo eficiente

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

El indicador es más aceptado si su monitorización y recolección es simple.

- Relevancia política

El indicador debe monitorizar los resultados principales, informar acerca de cualquier progreso, debe medir procesos y proporcionar información específica.

INDICADORES REPORTADOS EN LA LITERATURA

Es recomendable determinar subgrupos de indicadores en función de las dimensiones de la vulnerabilidad (es decir, sensibilidad y capacidad de adaptación). La Tabla 1-8, Tabla 1-9 y Tabla 1-10 presentan listas no exhaustivas de indicadores de vulnerabilidad reportados en la literatura para sus distintas dimensiones.

Tabla 1-8. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *exposición* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
Población afectada	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de familias sin acceso a avisos sobre la ocurrencia de la sequía • Densidad de población rural • Porcentaje de población relacionada con actividades agrícola
Actividad expuesta	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de agricultura de temporal • Tamaño del sector agrícola • Grado de autoabastecimiento de agua

Tabla 1-9. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *sensibilidad* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
Infraestructura hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño físico de la red de distribución • Antigüedad de la infraestructura
Sensibilidad de los ecosistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura vegetal como porcentaje del área de la cuenca • Usos de suelo • Coeficiente de varianza del NDVI • Uso de fertilizante por área de cultivo
Características socioeconómicas	<ul style="list-style-type: none"> • Proporción ingreso-egreso familiar • Coeficiente de desigualdad
Calidad de vida	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de individuos dentro de una familia que han migrado recientemente

1.3. VULNERABILIDAD

Tabla 1-9. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *sensibilidad* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
	<ul style="list-style-type: none"> • Percepción de cambios negativos en el ingreso familiar
Agua para uso agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de diversificación de cultivo • Área irrigada como porcentaje del área de cultivo • Tamaño promedio de las parcelas • Densidad de la población rural • Cantidad total de agua subterránea renovable disponible anualmente • Proporción del Producto Interno Bruto (PIB) derivado de la agricultura dividida entre la proporción de agua para uso agrícola • Extensión de la mecanización (tractores por hectárea)
Agua para uso doméstico	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura de agua potable • Porcentaje de la demanda anual de agua para uso doméstico • Eficiencia de la red de distribución
Agua para uso industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Proporción del PIB derivado de la industria dividida entre la proporción de agua para uso industrial • Dependencia de la energía hidroeléctrica (porcentaje de la capacidad instalada total dedicada a la generación hidroeléctrica)

Tabla 1-10. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *capacidad de adaptación* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
<i>Políticos/Institucionales</i>	
Apertura a la diversidad de opiniones	<ul style="list-style-type: none"> • Cabida para múltiples marcos de referencia, opiniones y definiciones del problema • Inclusión de múltiples partes interesadas, niveles y sectores en el proceso de gobierno • Disponibilidad de un amplio rango de opciones de políticas para hacer frente al problema • Presencia de medidas superpuestas y sistemas de respaldo
Capacidad de aprender	<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de procesos de seguimiento y evaluación de experiencias pasadas
Cabida para el cambio autónomo	<ul style="list-style-type: none"> • Accesibilidad de información de experiencias pasadas y sistemas de alerta temprana • Proceder de acuerdo a la planeación • Capacidad de auto-organización e innovación
Habilidad para ajustarse	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

Tabla 1-10. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *capacidad de adaptación* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
	<ul style="list-style-type: none"> • Progreso tecnológico y de aprendizaje
Capacidad institucional	<ul style="list-style-type: none"> • Estado de derecho
Herramientas institucionales	<ul style="list-style-type: none"> • Planes de mitigación de amenazas • Servicio de emergencia • Planes de respuesta ante emergencia • Comunicación interoperativas • Continuidad de planes de operación
Gobierno equitativo	<ul style="list-style-type: none"> • Legitimidad (apoyo público) • Equidad (reglas institucionales justas) • Capacidad de respuesta (las instituciones dan respuesta oportuna a la sociedad) • Existencia de procedimientos para la rendición de cuentas
Tipo de respuesta del sistema humano	<ul style="list-style-type: none"> • Reactivo • Proactivo
<i>Capacidad económica</i>	
Recursos humanos	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de dependencia económica • Alfabetismo • Densidad poblacional
Recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Recursos humanos (disponibilidad de experiencia, conocimiento y fuerza laboral) • Recursos financieros (disponibilidad de recursos financieros para respaldar medidas políticas e incentivos financieros) • Acceso a servicios financieros • PIB per cápita • Depósitos de ahorro per cápita
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura existente • Recursos tecnológicos y de información
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Redes sociales y arraigo social • Valores/Cohesión comunitaria
Capacidad para la acción comunitaria organizada	<ul style="list-style-type: none"> • Comprensión local del riesgo • Servicios de orientación y asesoría
Organizacional	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura, capacidad, liderazgo, entrenamiento y experiencia

1.3. VULNERABILIDAD

Tabla 1-10. Indicadores reportados en la literatura para describir la dimensión de *capacidad de adaptación* dentro de la vulnerabilidad (Assimacopoulos *et al.*, 2014).

Componente	Indicador
Proceso de toma de decisiones	<ul style="list-style-type: none">• Participación de las autoridades y aplicación de mecanismos• Acceso a la información• Voluntad de cambiar• Participación• Aprendizaje de la experiencia

Conocer los indicadores de vulnerabilidad más comúnmente empleados resulta de gran ayuda para iniciar una selección de los más adecuados. No obstante, la principal restricción para la incorporación de factores relevantes en el análisis es la disponibilidad de la información (González Tánago *et al.*, 2016), por lo que es común encontrar diferentes combinaciones de indicadores en la literatura.

Normalización de los indicadores

Los indicadores están expresados en diversas unidades, rangos y escalas. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un ajuste y transformación de sus valores a una dimensión uniforme. La literatura reporta una serie de métodos para la normalización de indicadores.

La selección de un método de normalización debe considerar las propiedades de los datos y los objetivos del indicador compuesto final. En este sentido, la selección del método de normalización depende diversos criterios, que incluyen (Nardo *et al.*, 2005):

1. si se dispone de información objetiva (datos cuantificables generados a partir de sensores, instrumentación, etc.) o subjetiva (susceptible a la interpretación y opinión);
2. si el comportamiento excepcional (por ejemplo, valores atípicos) requiere ser recompensado/penalizado;
3. si es importante que los resultados sean expresados en términos absolutos;
4. si es necesaria una evaluación comparativa con otro sitio de referencia;
y
5. si es necesario considerar la varianza de los indicadores.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

A continuación, se mencionarán las características de los más empleados (Carrão y Barbosa, 2015; Nardo *et al.*, 2005; OECD *et al.*, 2008).

POSICIONAMIENTO

Es la técnica de normalización más simple. Este método no se ve afectado por la presencia de valores atípicos y permite dar seguimiento a la evolución temporal de un sitio en términos de la posición relativa de su indicador con respecto al mismo indicador en el resto de los sitios dentro de la región de estudio. El valor normalizado del indicador q , en el sitio s , en el tiempo t , I_{qs}^t , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_{qs}^t = Rank(x_{qs}^t) \quad (1.16)$$

donde x_{qs}^t es el valor del indicador q , en el sitio s , en el tiempo t .

ESTANDARIZACIÓN (O CALIFICACIÓN Z)

Convierte los indicadores a una escala común con media en cero y desviación estándar de uno. La media en cero implica que es eliminada cualquier distorsión derivada de diferencias en la media de los indicadores. El factor de escala es la desviación estándar; por lo tanto, aquellos indicadores con valores extremos tienen un efecto mayor en el índice compuesto, lo que puede ser deseable si se tiene la intención de recompensar el comportamiento atípico (es decir, si se considera que un valor extremadamente alto en unos cuantos indicadores es mejor que muchos valores promedio). Los indicadores son normalizados mediante la siguiente ecuación:

$$I_{qs}^t = \frac{x_{qs}^t - \bar{x}_q^t}{\sigma_q^t} \quad (1.17)$$

donde \bar{x}_q^t es la media de los valores del indicador q , en el tiempo t , en todas las posiciones de la región de estudio; y σ_q^t es la desviación estándar de los valores de dicho indicador, en el tiempo t , en todos los sitios de la región de estudio.

REESCALADO

Esta técnica normaliza los indicadores dentro de un rango [0,1], substrayendo a cada valor el valor mínimo de todos los sitios dentro de la región de estudio y después dividiéndolo entre el rango de valores. En este

método los valores extremos y atípicos pueden distorsionar al indicador transformado. Además, tiene el efecto de ampliar el rango de indicadores que muestran poca variabilidad en la región de estudio, lo que incrementa su influencia en el índice compuesto final. El reescalado se lleva a cabo por medio de la siguiente ecuación:

$$I_{qs}^t = \frac{x_{qs}^t - \min(x_q^t)}{\max(x_q^t) - \min(x_q^t)} \quad (1.18)$$

donde $\min(x_q^t)$ y $\max(x_q^t)$ son el valor mínimo y máximo del indicador q , en el tiempo t , dentro de la región de estudio. En algunos existe una relación inversa entre la vulnerabilidad y los indicadores de vulnerabilidad (por ejemplo, el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita, tasa de alfabetismo en adultos, etc.). En estos casos, se aplica una transformación para vincular al valor más bajo del indicador con el valor más alto de vulnerabilidad, como sigue:

$$I_{qs}^t = 1 - \frac{x_{qs}^t - \min(x_q^t)}{\max(x_q^t) - \min(x_q^t)} \quad (1.19)$$

DISTANCIA A UNA REFERENCIA

Este método mide la posición relativa de un indicador con respecto a un sitio de referencia dentro de la región de estudio. Éste podría ser, por ejemplo, un objetivo a ser alcanzado en un periodo dado de tiempo. Otra alternativa es usar al sitio promedio dentro de la región, que obtendría un valor de 1, mientras que el resto de los sitios recibirían valores dependiendo de la diferencia de su valor con respecto al sitio promedio. Así, un indicador normalizado con valor mayor que 1 indica sitios con un desempeño por arriba del promedio. La fórmula para estimar el indicador normalizado mediante este método es la siguiente:

$$I_{qs}^t = \frac{x_{qs}^t}{x_{q\hat{s}}^t} \quad (1.20)$$

donde $x_{q\hat{s}}^t$ es el valor del indicador q , en el tiempo t , en el sitio de referencia \hat{s} .

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

ESCALA CATEGORIZADA

La escala categorizada asigna una calificación para cada indicador. Las categorías pueden ser numéricas o cualitativas (por ejemplo, “altamente vulnerable”, “moderadamente vulnerable” y “poco vulnerable”).

Comúnmente, las calificaciones se basan en los percentiles de la distribución del indicador en todos los sitios dentro de la región de estudio. Por ejemplo, el 5 % más alto de los valores recibe una calificación de 100, los valores entre el percentil 85 y el 95 reciben una calificación de 80, etc., hasta llegar a una calificación de 0, recompensando, así, a los sitios con valores mayores y penalizando a los de menor valor. A continuación, se muestra un ejemplo de la aplicación de una escala categorizada:

$$I_{qs}^t = \begin{cases} 0, & \text{si } x_{qs}^t < P^{15} \\ 20, & \text{si } x_{qs}^t < P^{25} \\ 40, & \text{si } x_{qs}^t < P^{65} \\ 60, & \text{si } x_{qs}^t < P^{85} \\ 80, & \text{si } x_{qs}^t < P^{95} \\ 100, & \text{si } x_{qs}^t > P^{95} \end{cases} \quad (1.21)$$

Esta técnica excluye una gran cantidad de información relativa a la varianza de los indicadores normalizados. Además, en el caso de un indicador con poca variación, las bandas de percentiles imponen una categorización de los datos que no corresponde con la distribución original de los valores.

INDICADORES DEBAJO O ARRIBA DE LA MEDIA

Los indicadores son transformados de modo que los valores cercanos a la media reciben una calificación de 0, mientras que los que presentan valores arriba y debajo de cierto umbral reciben una calificación de 1 y -1, respectivamente. Este método de normalización se resume en la siguiente ecuación:

$$I_{qs}^t = \begin{cases} 1, & \text{si } w > (1 + p) \\ 0, & \text{si } (1 - p) \leq w \leq (1 + p) \\ -1, & \text{si } w < (1 - p) \end{cases} \quad (1.22)$$

donde $w = x_{qs}^t / \bar{x}_q^t$, y p es un umbral arbitrario alrededor de la media.

Este método es simple y no se ve afectado por valores atípicos. Sin embargo, tiene las desventajas de la arbitrariedad en la definición del nivel umbral y la

falta de información del nivel absoluto. Por ejemplo, si el valor de un indicador dado en un sitio “A” es 3 veces (300 %) arriba de la media, y el valor en un sitio “B” es 25 % arriba de la media, ambos sitios resultarán evaluados como ‘arriba de la media’, si el umbral definido fuera del 20 % alrededor de la media.

En casos en que se desea evaluar el desempeño de un sitio en función del tiempo, la media del indicador es calculada para un año de referencia (usualmente, el tiempo inicial, t_0). Un indicador que cambia de $I_{qs}^t = -1$ a $I_{qs}^{t+1} = 1$ en el tiempo consecutivo siguiente, tiene un efecto positivo en el índice compuesto.

TASA DE VARIACIÓN

El resultado de esta técnica representa el porcentaje de crecimiento respecto al periodo anterior, en lugar de un nivel absoluto. Es posible aplicarla solo si existe información sobre la variación temporal del indicador. La siguiente fórmula resume este método en una sola expresión:

$$I_{qs}^t = \frac{x_{qs}^t - x_{qs}^{t-1}}{x_{qs}^t} \times 100 \quad (1.23)$$

Asignación del peso

La asignación de diferentes pesos a cada indicador permite reflejar sus prioridades operativas o factores teóricos (Nardo *et al.*, 2005; OECD *et al.*, 2008).

Independientemente del método empleado, la asignación de pesos es, esencialmente, un juicio de valor (OECD *et al.*, 2008) y, como tal, es susceptible de recibir la influencia del conjunto particular de creencias y objetivos personales del individuo o grupo que los definen. Por lo tanto, la transparencia en su definición es primordial para una interpretación adecuada y, en todo caso, una futura revisión.

A continuación se describen algunos de los métodos que existen en la literatura para la asignación de pesos a los indicadores de un índice compuesto de vulnerabilidad ante sequías.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

MÉTODOS PARTICIPATIVOS

Entre éstos se encuentra el enfoque conocido como *Proceso de Distribución de Presupuesto* (BAP). Se basa en la consulta de la opinión de expertos que contribuyen con su conocimiento, distribuyendo un “presupuesto” de cien puntos entre los indicadores de vulnerabilidad, priorizando unas variables sobre otras. Una vez realizado este ejercicio, se puede compilar la información procesada y calcular los factores de ponderación de cada variable. Es posible iterar el proceso hasta converger a una solución más o menos acordada por todos ellos.

En la medida en que el conjunto de expertos seleccionado refleje la diversidad de ramas del conocimiento, áreas de experiencia e intereses en juego, el indicador compuesto contará con mayor consenso al momento de su comunicación y, por lo tanto, se transformará en una herramienta válida y eficaz para influenciar la aplicación de políticas de gestión del riesgo de sequías.

El problema más común que puede surgir al aplicar esta técnica es que los expertos prioricen los indicadores con base en un criterio político, en lugar de la importancia relativa de cada uno sobre la vulnerabilidad ante sequías.

Otro método participativo es el de la *opinión pública*, que se basa en encuestas de opinión enfocadas en el grado de “preocupación” (por ejemplo, alto o bajo) que representa para el encuestado los temas relacionados con cada indicador.

DISTANCIA A OBJETIVOS PLANTEADOS

Esta técnica consiste en definir las necesidades de intervenciones de política y la urgencia por resolver los problemas a través del cálculo de la “distancia” a objetivos a ser alcanzados. El criterio principal indica que cuanto más alejado se encuentre el valor de un indicador de su objetivo, mayor será su prioridad. De esta forma, el factor de ponderación puede determinarse restándole a la unidad el cociente entre el valor del indicador y el objetivo que se plantea alcanzar para éste.

PESOS EQUIPOTENCIALES

En este enfoque, todos los indicadores reciben el mismo peso. Su aplicación puede indicar (i) que todos los indicadores son igualmente prioritarios; o (ii) que no existen fundamentos sólidos que indiquen la necesidad de ponderar

1.3. VULNERABILIDAD

discrecionalmente las distintas variables. Debe considerarse que si las variables están agrupadas en dimensiones y éstas son posteriormente agregadas en un índice compuesto, aplicar un peso igual a todas las variables puede resultar en una estructura desbalanceada del índice compuesto (las dimensiones que agrupen el mayor número de indicadores tendrá una mayor ponderación).

ASIGNACIÓN PROPORCIONAL

Este esquema está basado en la disponibilidad de información, en lugar de las relaciones deducidas de un marco teórico. Asigna el peso de en función de la cantidad de indicadores que posee cada componente de la vulnerabilidad (es decir, sensibilidad, capacidad de adaptación) dentro del conjunto de variables consideradas. Bajo este enfoque, el componente del que más indicadores sean incluidos en el análisis tendrá un mayor peso en la agregación final.

ASIGNACIÓN ALEATORIA

Este método es una alternativa para los casos en que la importancia relativa de los distintos indicadores considerados no es suficientemente clara. Requiere la aplicación de un gran número de simulaciones Montecarlo con distintas combinaciones de valores de ponderación.

EL ANÁLISIS DE LA ENVOLVENTE DE LOS DATOS Y EL ENFOQUE DEL BENEFICIO DE LA DUDA

El Análisis de la Envoltente de los Datos (DEA) es una herramienta de programación lineal para evaluar el desempeño de un conjunto de entidades pares. Ha sido aplicado en la macroevaluación del desempeño de productividad de los países y en diversos indicadores compuestos. En este último contexto, el método ha sido llamado enfoque del 'Beneficio de la Duda (BOD) (Laurens Cherchye *et al.*, 2007).

Según este enfoque, es posible obtener información sobre el esquema de pesos apropiado para la definición de una referencia a partir de los datos del mismo sitio analizado. La interpretación que ofrece indica que el desempeño relativamente bueno de un sitio dentro de la región de estudio en un indicador en particular es evidencia de que dicho sitio considera tal indicador relativamente importante.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

Para la construcción de un índice compuesto, la técnica BOD considera un conjunto de Q indicadores para S sitios, donde I_{qs} es el valor del indicador q en el sitio s , y w_{qs} es el peso que corresponde a dicho indicador. Un valor alto es interpretado como un mayor desempeño. En ausencia de información confiable suficiente acerca del esquema “correcto” de pesos, Cherchye *et al.* (2008) propusieron seleccionar la combinación de pesos que maximice la calificación del índice compuesto para el sitio en consideración, resolviendo el siguiente problema de programación lineal:

$$CI_s = \max_{w_{qs}} \left(\sum_{q=1}^Q I_{qs} w_{qs} \right) \quad (1.24)$$

siempre que $\sum_{q=1}^Q I_{qs} w_{qs} \leq 1$, $w_{qs} \geq 0$. En este problema, los pesos son no negativos, y la calificación de un sitio se encuentra entre 0 (peor) y 1 (mejor).

Si la existencia de múltiples sitios con calificación máxima (1) dificulta la evaluación del conjunto, resulta necesario agregar otra restricción. Una alternativa es la de aplicar el criterio de las *porciones del pastel*. Las ventajas de este enfoque son que no depende de las unidades de medida de los indicadores, y que revela directamente el modo en que cada porción contribuye al índice compuesto. La porción q para el sitio s está dada por el producto $I_{qs} w_{qs}$ y la suma de las porciones resulta igual que el valor del índice compuesto CI_s . De este modo la restricción es impuesta sobre las porciones de un pastel, en lugar de los pesos.

Agregación

La construcción de un índice compuesto requiere combinar los distintos indicadores de manera que la vulnerabilidad de un sistema ante la ocurrencia de un evento de sequía sea bien representada. Al igual que en las etapas anteriores, existe una variedad de técnicas para llevar a cabo la agregación de los indicadores para la construcción de un índice compuesto. Éstas pueden ser agrupadas en dos enfoques: *modelos compensatorios* (lineales y geométricos) y *modelos no compensatorios*. Lo que distingue a un enfoque del otro es la influencia que el valor de un indicador dado ejerce en el resto.

Los modelos compensatorios (lineales y geométricos) asumen que una calificación baja en uno de sus indicadores puede ser compensada con una calificación alta en otro. Por ejemplo, que una alta densidad de infraestructura de irrigación (es decir, un indicador de baja vulnerabilidad) compensa una reducida capacidad de almacenamiento de agua en la región (es decir, un indicador alta vulnerabilidad). Sin embargo, esta compensación no se ve reflejada en la realidad ya que la infraestructura de irrigación es útil solamente si existe agua almacenada disponible para ser irrigada (Carrão y Barbosa, 2015).

MÉTODOS ADITIVOS

La técnica de agregación aditiva cuya aplicación ha sido más extendida es la suma pesada de los indicadores normalizados (OECD *et al.*, 2008; véase, por ejemplo, IMTA, 2015; Naumann *et al.*, 2014). Esta técnica se expresa como sigue:

$$CI_s = \sum_{q=1}^Q w_q I_{qs} \quad (1.25)$$

donde $\sum_q w_q = 1$ y $0 \leq w_q \leq 1$, para todos los indicadores $q = 1, \dots, Q$ y todos los sitios $s = 1, \dots, M$.

MÉTODOS GEOMÉTRICOS

Si bien los métodos geométricos son modelos compensatorios, en éstos el grado de compensación entre los indicadores es inferior que en los métodos aditivos. Mientras que los métodos aditivos recompensan a los indicadores proporcionalmente a los pesos asignados, los métodos geométricos recompensan a los sitios con indicadores mejor puntuados.

La técnica de agregación geométrica, conocida también como *índice de privación*, se expresa como sigue:

$$CI_s = \prod_{q=1}^Q I_{q,s}^{w_q} \quad (1.26)$$

donde $\sum_q w_q = 1$ y $0 \leq w_q \leq 1$, para todos los indicadores $q = 1, \dots, Q$ y todos los sitios $s = 1, \dots, M$.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

En la agregación geométrica, la compensación de los valores de los indicadores es menor para indicadores con valores bajos. Ante este escenario, un sitio con baja calificación en un indicador individual requerirá una calificación mucho mayor en el resto para mejorar su situación. Por otro lado, la ganancia derivada del incremento en un indicador con baja calificación es mucho mayor que en un indicador con alta calificación. Lo anterior representa un incentivo para atender aquellos sectores/actividades/alternativas con calificación baja dado que esto genera mayor oportunidad de mejorar la posición compuesta de un sitio con respecto al conjunto.

ENFOQUE MULTICRITERIO NO COMPENSATORIO

En un modelo no compensatorio, la calificación de cada indicador es independiente de la calificación del resto de los indicadores. Esto puede ser particularmente interesante en casos en los que se buscan metas igualmente importantes para múltiples indicadores.

El Enfoque Multicriterio No Compensatorio (NMC) señala que, dado un conjunto de indicadores $G = \{x_q\}$, $q = 1, \dots, Q$, y un conjunto finito de sitios $M = \{c\}$, $c = 1, \dots, M$, se asume que la evaluación de cada sitio s con respecto a la calificación de un indicador individual x_q está basada en una escala de medición de intervalos o proporciones. Además, se asume que un valor alto de un indicador refleja un mejor desempeño. Así mismo, se asume la existencia de un conjunto de pesos $w = \{w_q\}$, $q = 1, \dots, Q$, que $\sum_{q=1}^Q w_q = 1$, interpretados como *coeficientes de importancia*. Esta información constituye la *matriz de impacto*.

El método de agregación puede ser dividido en dos pasos (OECD *et al.*, 2008):

- comparación por pares de sitios según el conjunto completo de indicadores utilizados; y
- clasificación de sitios en un preorden completo

El primer paso resulta en una matriz $M \times M$, E , llamada *matriz de superación*. Cada elemento de $E: e_{jk}, j \neq k$ es el resultado de la comparación en pares,

correspondiente a todos los indicadores Q , entre los sitios j y k . Tal comparación global por pares se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$e_{jk} = \sum_{q=1}^Q \left[w_q(Pr_{jk}) + \frac{1}{2} w_q(In_{jk}) \right] \quad (1.27)$$

donde $w_q(Pr_{jk})$ y $w_q(In_{jk})$ son los pesos de los indicadores que presentan una relación de preferencia e indiferencia, respectivamente. En otras palabras, la calificación de un sitio j es la suma de los pesos de los indicadores individuales en que este sitio supera al sitio k , así como de la mitad de los pesos de los indicadores individuales en los que ambos sitios obtuvieron la misma calificación.

La forma en que esta información puede ser combinada cuenta con una gran gama de procedimientos de clasificación. La OECD *et al.* (2008) propuso aplicar el procedimiento Condorcet-Kemeny-Young-Levenglick (CKYL), de acuerdo al que la mayor potencia es la que cuenta con el mayor número de indicadores para cada comparación por pares, sumada en todos los pares de sitios considerados. En términos matemáticos, todas las comparaciones por pares $M(M - 1)$ componen a la matriz de superación E . Llámese R al conjunto de todas las posibles clasificaciones completas de alternativas $M!$, $R = \{r_s\}$, $s = 1, \dots, M!$ Para cada r_s , se calcula la calificación φ_c correspondiente como la suma de e_{jk} en todos los pares j, k de alternativas. Es decir, $\varphi_c = \sum e_{jk}$, donde $j \neq k$, $s = 1, \dots, M!$ y $e_{jk} \in r_s$. La clasificación final, r^* , es la solución de:

$$r^* \Leftrightarrow \varphi_* = \sum e_{jk} \quad (1.28)$$

donde $e_{jk} \in R$.

Este método de agregación tiene la ventaja de permitir tratar conjuntamente información cualitativa y cuantitativa. Además, no requiere de ninguna manipulación o normalización para asegurar la comparabilidad de los indicadores. Por otro lado, tiene las desventajas de la posible presencia de clasificaciones reversibles, en las que el sitio a es superior al sitio b , b es superior a c , pero c es superior a a . Así mismo, nunca es usada la información de intensidad, de modo que si un indicador para el sitio a es

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

mucho menor que el mismo indicador para el sitio *b*, produce la misma clasificación que en el caso en que dicha diferencia es muy pequeña.

Ante este escenario, en el que existe una gran variedad de técnicas para determinar cada una de las etapas de la construcción de un índice compuesto de vulnerabilidad ante la ocurrencia de un evento de sequía, resulta indispensable documentar de manera transparente la metodología y criterios adoptados. De este modo, la subjetividad implícita en este proceso se ve acotada y se sientan bases para una futura revisión.

1.3.2. La vulnerabilidad como pérdidas derivadas de una sequía

La gravedad de los impactos de una sequía es variable y puede llegar, en los casos más severos, a afectar el bienestar de naciones enteras (ver, por ejemplo, Bernhardt *et al.*, 2012; Richardson, 2009; Weiss, 1982). Durante el periodo 1995-2015, las sequías provocaron pérdidas económicas de 5,000 millones de dólares anuales a nivel mundial, y afectaron a 1,100 millones de personas. Además, en el mismo periodo fueron reportadas 22,000 muertes vinculadas directamente con la ocurrencia de este fenómeno (CRED, 2015).

La sequía puede presentar impactos en sectores tales como (i) agricultura y ganadería, (ii) silvicultura, (iii) acuicultura y pesca, (iv) energía e industria, (v) transporte acuático, (vi) turismo y recreación, (vii) abastecimiento público de agua, (viii) calidad del agua, (ix) ecosistemas acuáticos, (x) ecosistemas terrestres, (xi) degradación del suelo, (xii) incendios forestales, (xiii) calidad del aire, (xiv) salud humana, y (xv) conflictos sociales (Stahl *et al.*, 2016).

En el sector agrícola, un déficit prolongado de humedad del suelo puede provocar daños en los cultivos y pastizales. Éstos representan el principal impacto económico directo de la sequía. Asimismo, los consumidores de productos agrícolas sufren pérdidas a través del incremento en sus precios. Al respecto, en el plano internacional, existe una gran cantidad de estudios de impactos de sequía enfocados en sus efectos en la producción agrícola, que son los menos complejos para cuantificar. En contraste, existe una marcada falta de información y comprensión de los impactos de la sequía en otros sectores (Ding *et al.*, 2011; Stahl *et al.*, 2016).

El abastecimiento público de agua se ve afectado por sequías severas y prolongadas al verse disminuido el volumen disponible y deteriorada la calidad del agua en las fuentes de abastecimiento. Los impactos en este

sector se ven representadas por la pérdida de producción o ventas en industrias y negocios debido a la ralentización o clausura de los trabajos; costos derivados de la adquisición de suministros de emergencia; reducción de los ingresos e incremento en los costos de monitoreo y tratamiento para los sistemas operadores del agua.

Como se mencionó anteriormente, presentar al riesgo como un argumento económico resulta interesante desde un enfoque de gestión del riesgo de sequías. Esto es posible concibiendo la vulnerabilidad como la suma de consecuencias económicas derivadas de un evento de cierta severidad. Si bien existen impactos cuyo valor es intangible, este enfoque permite evaluar los beneficios esperados de programas de mitigación de impactos para una toma de decisiones informada (Meyer *et al.*, 2014). A través de un análisis costo-beneficio, es posible determinar si un conjunto de medidas para la gestión del riesgo son económicamente aceptables si la suma de sus beneficios —es decir, los costos evitados— excede los costos de su implementación (Ding *et al.*, 2011).

Una de las principales dificultades para la atribución de pérdidas a un evento de sequía causante es separar el alcance de la influencia de la sequía de otros factores. La información disponible para hacerlo es, generalmente, limitada y se encuentra dispersa en reportes regionales y nacionales de agencias ambientales, notas periodísticas, informes de sistemas locales de abastecimiento de agua, etc.

Logar y van den Bergh (2013) clasificaron los impactos económicos derivados de la sequía en tres tipos:

Costos directos

Pérdidas en actividades del sector primario, como la agricultura (por ejemplo, reducción en la producción de cultivos y ganado), pérdidas relacionadas con la disponibilidad de agua (por ejemplo, en compañías de abastecimiento de agua, generación hidroeléctrica, transporte acuático), y daños en edificaciones e infraestructura debido a la subsidencia del suelo.

Costos indirectos

Ocurren como consecuencia de los impactos directos en las actividades del sector primario en el resto de la economía; por lo tanto, son

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUIÁS

observados después de los costos directos. Incluyen el aumento en el desempleo, cambios en los precios de alimentos y maderas, pérdidas comerciales, reducción de ingresos por impuestos, o pérdidas en sectores económicos relacionados indirectamente con las sequías (por ejemplo, la industria de los alimentos).

Costos intangibles

Asociados con impactos ambientales, sociales y en la salud. Los costos ambientales incluyen los daños a la vida silvestre y hábitats acuáticos, enfermedades de animales, pérdida de biodiversidad, etc. Los costos sociales se ven reflejados en pérdida de vidas humanas, migración (usualmente, de áreas rurales a urbanas), conflictos sociales, entre otros. Los costos en la salud se refieren al incremento del riesgo de enfermedades, y malnutrición y hambruna debido a la escasez de alimentos.

En la literatura se reporta una variedad de métodos para la evaluación de costos tangibles de la sequía. En la Tabla 1-11 se hace un resumen de los principales enfoques y sus características.

Tabla 1-11. Métodos de evaluación de costos de la sequía (modificado de Logar & van den Bergh, 2013).

Método	Tipo de costo evaluado	Tipo de información necesaria
Función de daños	Directos e indirectos tangibles	<ul style="list-style-type: none"> • Registro de impactos asociados a un evento o tiempo. •
Técnicas de valuación de mercado <ul style="list-style-type: none"> • Precio de mercado • Función de producción • Costos evitados • Costos de reemplazo o reparación 	Directos e indirectos	<ul style="list-style-type: none"> • Precios y cantidades de bienes y servicios vendidos y comprados en los mercados. • Salidas y parámetros de factores de producción para la función de producción. • Diferencia entre el costo real y el costo potencial sin las mejoras. • Costo de reemplazar o reparar un bien o servicio.
Evaluación de efectos en el PIB y producción agrícola	Directos e indirectos (muy limitados)	<ul style="list-style-type: none"> • Porción de participación de la agricultura en el PIB. • Caída del PIB debido a la sequía.
Análisis Entrada-Salida	Particularmente útil para los costos indirectos	<ul style="list-style-type: none"> • Tablas de entradas-salidas.

1.3. VULNERABILIDAD

Tabla 1-11. Métodos de evaluación de costos de la sequía (modificado de Logar & van den Bergh, 2013).

Método	Tipo de costo evaluado	Tipo de información necesaria
Función de daños	Directos e indirectos tangibles	<ul style="list-style-type: none">• Registro de impactos asociados a un evento o tiempo.
Análisis de Equilibrio General Calculado	Particularmente útil para los costos indirectos	<ul style="list-style-type: none">• Tablas de entradas-salidas.• Matrices de cambios en el comercio, impuestos, factores de entrada e inventario.
Modelación biofísica-agroeconómica	Directos y algunos indirectos	<ul style="list-style-type: none">• Información biofísica (suelo, erosión, producción de cultivos, climatológica).• Datos socioeconómicos.
Modelación hidrológica-económica acoplada	Directos, algunos indirectos y algunos intangibles	<ul style="list-style-type: none">• Información hidrológica.• Información económica.
Modelación ricardiana del precio hedónico	Directos	<ul style="list-style-type: none">• Datos meteorológicos.• Valor y características del suelo.• Datos económicos.

Función de daños

Un enfoque común para evaluar las consecuencias negativas de amenazas naturales es el uso de funciones de daño —también conocidas como funciones de vulnerabilidad o curvas nivel-daño—. Dichas funciones son, usualmente, curvas continuas que describen la relación entre la severidad de la amenaza y sus consecuencias negativas medibles mediante la construcción de funciones de daño basadas en el ajuste de funciones a la información observada (Bachmair *et al.*, 2017; Naumann *et al.*, 2015).

La aplicación de esta técnica requiere definir el indicador que caracterizará la amenaza, la variable de daño que será analizada, y una relación funcional adecuada. La definición de cada uno de estos elementos no es trivial y se ve limitada, principalmente, por la disponibilidad y escalas temporal y espacial de la información necesaria para llevar a cabo el análisis.

Técnicas de valuación de mercado

Las metodologías basadas en las interacciones del mercado para asignar un valor monetario a los bienes y servicios son conocidas como técnicas de

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

valuación de mercado. Éstas son particularmente útiles para evaluar los costos directos de la sequía, pero pueden ser usadas también para estimar algunos costos indirectos. La precisión de estas técnicas es buena, aunque depende en gran medida de los parámetros y modelos aplicados. A continuación, se resumen los principios en los que se basan las distintas técnicas de valuación de mercado.

MÉTODO DEL PRECIO DE MERCADO

Permite estimar el valor económico de cualquier producto o servicio comercializado en el mercado. Por ejemplo, los costos directos de la sequía en la agricultura pueden ser evaluados observando la magnitud de la pérdida de cultivo derivada de una sequía y sus precios de mercado. Esta información hace posible estimar los excedentes del consumidor² y el productor³ antes y después del evento. La diferencia representa el costo de las pérdidas de producción del cultivo debidas a la sequía.

FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN

Especifica la producción de una compañía, industria o una economía entera, basado en la combinación de insumos; *i. e.*, factores de producción. Los insumos ambientales y de materia prima también son usados como factores de producción en la generación de otros bienes. Suponiendo que la función de producción y los valores de los parámetros son conocidos, es posible introducir un cambio en el insumo ambiental (por ejemplo, el deterioro de la calidad del agua) y estimar sus efectos en la producción en términos monetarios (*e. g.*, un declive en la producción de la industria pesquera o mayores costos en su producción).

ENFOQUE DEL COSTO EVITADO

Está basado en la evaluación de gastos que habrían sido necesarios para mitigar o compensar los efectos negativos de un cambio en la entrada

² El 'excedente del consumidor' es una medida del beneficio del consumidor de un bien. Se calcula como la diferencia entre la cantidad que el consumidor está dispuesto y es capaz de pagar por un bien o servicio y su precio de mercado.

³ El 'excedente del productor' es una medida del beneficio que el productor de un bien recibe por venderlo en el mercado. Se calcula como la diferencia entre la cantidad que el productor recibe por éste y la cantidad mínima que está dispuesto a aceptar.

ambiental. Por ejemplo, menos agua disponible para la agricultura debido a una sequía puede ser valuada con base en los costos de irrigación.

ENFOQUE DEL COSTO DE REEMPLAZO O REPARACIÓN

Supone que los costos de reemplazar o reparar un bien o servicio ambiental dañado ofrece una estimación razonable de su valor. Un ejemplo es evaluar el costo de la erosión del suelo debida a la sequía a través de la estimación de los costos de recuperación física y reemplazo del suelo perdido, sus nutrientes y agua almacenada.

Evaluación de efectos en el PIB y producción agrícola

Este enfoque explora la relación entre un evento de sequía y el desempeño económico de un país. Compara un cambio en el producto interno bruto (PIB) del sector agrícola con cambios en el PIB total de un país durante un año en el que haya ocurrido una sequía con respecto a un año antes de la sequía. La precisión esperada de este enfoque es pobre debido a que no considera los efectos en la variación del PIB que ejercen otros factores distintos a la ocurrencia de la sequía.

Análisis Entrada-Salida

Este método permite examinar los efectos que ejerce un cambio en el precio, salida, demanda final (incluyendo el consumo personal, gastos de gobierno, y exportaciones), importaciones, o elementos de valor agregado (costos laborales, impuestos netos), en un sector económico en el resto de la economía. En el contexto de la sequía, este enfoque es particularmente útil para evaluar los costos indirectos; *i. e.*, el efecto de las pérdidas en la agricultura y abastecimiento de agua en otros sectores económicos.

Análisis del Equilibrio General Calculado (CGE)

Este modelo examina los impactos en toda una economía derivados de un cambio en una política pública (*e. g.*, impuestos, comercio, energía, políticas agrícolas), tecnología, exportaciones, u otros factores externos. El análisis CGE puede simular los efectos de una sequía en las salidas y empleos en diferentes sectores de la economía en un nivel regional o nacional. Sus desventajas incluyen la necesidad de una gran cantidad de información y su limitado potencial para incluir imperfecciones del mercado (*e. g.*, asume un comportamiento óptimo de los consumidores y productores, y equilibrio de mercado).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO ANTE SEQUÍAS

Modelación biofísica-agroeconómica

En esta metodología, se aplican modelos fisiológicos forzados con distintos escenarios climatológicos (temperatura-precipitación) a partir de sequías hipotéticas o históricas. Estos modelos ofrecen estimaciones biofísicas de las respuestas de los cultivos (producción, uso de agua y nutrientes) a los eventos climáticos. Las estimaciones de producción simulada son después incorporadas en modelos socioeconómicos para predecir decisiones a nivel de los productores, que son después agregadas a niveles de mercado para predecir cambios en la oferta, precios y bienestar económico.

Se espera que la precisión de las estimaciones de producción agrícola sea alta. Sin embargo, la modelación de las interacciones entre la fisiología de los cultivos, las condiciones climáticas, y los factores económicos es demasiado compleja, lo que limita su precisión.

Modelación hidrológica-económica acoplada

Estos modelos son empleados para analizar los impactos de la distribución del agua y el uso que le dan los diferentes sectores bajo distintos escenarios de políticas públicas. Usualmente, consisten en tres componentes: (1) factores hidrológicos, (2) factores económicos, incluyendo el costo del agua y las ganancias generadas por su uso, y (3) factores institucionales que afectan a los componentes hidrológico y económico.

Los modelos hidrológicos-económicos son una útil herramienta de apoyo a la toma de decisiones. La interpretación de los resultados del modelo hidrológico en términos de pérdidas económicas ofrece una estimación relativamente buena de los daños de una sequía.

Modelación ricardiana del precio hedónico

En el método del precio hedónico, el precio de un bien de mercado es relacionado con sus características o los servicios que éste ofrece. En la Economía Ambiental es ampliamente usado para analizar la variación de precios de vivienda en función del valor de los servicios ambientales locales. La modelación ricardiana del precio hedónico usa el mismo principio para explicar las variaciones en los precios del suelo agrícola a partir de cambios en las condiciones climatológicas (temperatura y lluvia).

1.3. VULNERABILIDAD

El valor del suelo es considerado como un indicador preciso del bienestar económico dado que refleja el valor presente de un flujo futuro de ingresos. Sin embargo, la relación entre la ocurrencia de un desastre natural y el valor de las posesiones capitales es, más bien, compleja.

2. Sintetizar la información necesaria para calcular y proponer métodos de evaluación de riesgo ante sequías para el territorio mexicano, proponiendo indicadores que permitan su estudio, cuantificación y monitoreo en México

2.1. Información disponible

La elección de una metodología para la evaluación del riesgo de sequía depende en gran medida de la información de que se dispone para aplicarla. Por tal motivo, a continuación, se hace una revisión de las fuentes de información disponibles de variables climatológicas e hidrológicas, así como

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

de indicadores socioeconómicos para la evaluación del riesgo de sequía en México. Han sido incluidas en esta revisión fuentes de observación directa, de percepción remota y de modelos de superficie terrestre y asimilación de datos, así como información de impactos de eventos de sequía pasados.

2.1.1. Variables climatológicas e hidrológicas

Base de Datos Climatológica Nacional

La Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) contiene registros históricos de más de 6,000 estaciones climatológicas distribuidas en todo el territorio mexicano, de las que actualmente se encuentran en operación aproximadamente 3,500. Está disponible para consulta y descarga a través de la plataforma en línea denominada Sistema CLICOM (<http://clicom-mex.cicese.mx/>), producto del Proyecto Climático de Computación (*Climate Computing Project*, CLICOM), conducido en la década de 1990 por la Organización Meteorológica Mundial para asistir a todos los países miembros en la mejora de servicios de procesamiento de datos climatológicos. Las estaciones de medición que alimentan a la base de datos registran diariamente a las 8:00 a. m. (hora local) la temperatura máxima y mínima de las últimas 24 horas y los valores acumulados de precipitación y evaporación. Adicionalmente, se toman observaciones como las del estado de nubosidad del cielo y la ocurrencia de granizo, helada, tormenta o neblina (Miranda Alonso *et al.*, 2006).

Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales

El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) integra los registros de la red hidrométrica nacional de México. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), da soporte y actualiza el BANDAS, que cuenta con el historial de registros de más de 2,200 estaciones hidrométricas en cauces naturales y canales de irrigación y casi 200 almacenamientos. Los registros de aforo en corrientes concentran información a distintas escalas temporales referente a gastos medios diarios, datos hidrométricos mensuales y anuales, gastos instantáneos, flujo de sedimentos, y nivel del agua. Por otro lado, los registros en almacenamientos incluyen información del funcionamiento diario de vaso, valores extremos mensuales de gasto, volumen y lectura de escala, datos horarios, y datos especiales en algunos vasos de almacenamiento con datos actualizados hasta hace no más de tres

años, aproximadamente. Su descarga es gratuita y libre desde el sitio web del protocolo de transferencia de archivos (FTP) de la CONAGUA (<ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas>; Solís-Alvarado *et al.*, 2015).

50-Year Reconstruction Rainfall Dataset

El Conjunto de Datos de Reconstrucción de Lluvia de 50 Años consiste en una reconstrucción de 50 años de datos mensuales derivados de pluviómetros a nivel global desde 1948 hasta el presente con resoluciones regulares de 0.5°, 1.0° y 2.5°. Los conjuntos de datos mallados son el resultado de la interpolación de alrededor de 15,000 estaciones recolectadas de la *Global Historical Climate Network* versión 2 (GHCN; Vose *et al.*, 1992) y el *Climate Anomaly Monitoring System* (CAMS; Ropelewski *et al.*, 1984). Esta información se encuentra disponible libremente a través del sitio FTP (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/50yr/gauge/>) del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), del *Climate Prediction Center* de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EE. UU. (NOAA).

Conjunto de datos mensuales de precipitación del GPCC

Este conjunto de datos del *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) ofrece tres productos de datos de precipitación. En primer lugar, se encuentra la monitorización para el periodo 2007 al presente, basada en datos derivados de 7,000 estaciones. El segundo es el Producto de Datos Completos (V7) para el periodo 1901-2013, basado en datos derivados de 67,200 alrededor del mundo con registros de extensión mayor que 10 años. Estos datos contienen los totales mensuales en mallas regulares en presentaciones de resolución espacial de 0.5°, 1.0° y 2.5°. El tercer producto consiste en una malla regular de 1.0°; es el más actualizado, pero tiene la desventaja de ser derivado a partir de un número limitado de estaciones. Está disponible libremente desde el sitio web del *Earth System Research Laboratory* (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>), de la NOAA.

Soil Moisture Climate Change Initiative (CCI)

Este producto ofrece datos diarios de humedad superficial del suelo con una resolución espacial de 0.25°, generados usando radares activos y pasivos de microondas de percepción remota con cobertura temporal de 1978 hasta 2015. Consiste en tres productos: un conjunto activo, un conjunto pasivo y

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

uno combinado. Su descarga es libre desde el sitio web del proyecto (<http://www.esa-soilmoisture-cci.org/>).

Global Land Data Assimilation System, version 2 (GLDAS-2)

GLDAS (Rodell *et al.*, 2004) es generado mediante un marco de infraestructura digital llamado *Land Information System* (LIS; Kumar *et al.*, 2006), desarrollado por el Laboratorio de Ciencias Hidrológicas del Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los EE. UU. (NASA). Consiste en diversos modelos de superficie terrestre (LSM; desacoplados de cualquier modelo atmosférico) forzados con observaciones, lo que evita sesgos de forzamientos resultados de predicciones climáticas numéricas. Su objetivo principal es integrar productos de percepción remota y observación terrestre con técnicas de modelación para generar campos de estado y flujo de superficie terrestre (agua y energía; por ejemplo, precipitación, escurrimiento, radiación solar, etc.).

En 2012 fue publicada una segunda versión de GLDAS (GLDAS-2), que cuenta con dos componentes: uno forzado enteramente con los datos meteorológicos de Princeton (conocida como GLDAS-2.0), y otro forzado con un conjunto de datos basados en una combinación de modelo y observación (conocida como GLDAS-2.1). Actualmente, GLDAS-2.0 contiene resultados para el periodo 1948-2010, mientras que GLDAS-2.1 abarca un periodo desde 2000 hasta el presente y es actualizado mensualmente.

Hasta la fecha, el único LSM para GLDAS-2 es el modelo NOAH. Sin embargo, la documentación del producto indica que en el futuro se incorporarán tres modelos adicionales. Los conjuntos de datos de GLDAS-2 pueden ser descargados en escala temporal trihoraria y mensual y con resoluciones de 0.25° y 1.0° en el sitio web del Centro de Datos de Ciencias de la Tierra y Servicios de Información de Goddard (GES DISC; <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>).

Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2)

MERRA-2 (Rienecker *et al.*, 2011) usa la versión 5 del modelo *Goddard Earth Observing System* (GEOS-5) y su sistema de asimilación de datos para generar un análisis atmosférico retrospectivo. El análisis retrospectivo

combina campos generados por modelaciones con observaciones de distribuciones espacial y temporal irregulares para formar un conjunto de datos hidrológicos y meteorológicos mallados.

La malla empleada para MERRA-2 es de $1/2^\circ$ de latitud por $2/3^\circ$ de longitud, con 72 niveles verticales, desde la superficie hasta 0.01 hPa. Los conjuntos de datos de MERRA-2 comprenden el periodo desde enero de 1980 y hasta el presente, actualizándose de manera mensual. Pueden obtenerse en escala temporal horaria y mensual en el sitio web del Centro de Datos de Ciencias de la Tierra y Servicios de Información de Goddard (GES DISC).

CPC Soil Moisture

Este conjunto de datos mensuales consiste en valores promedio de humedad del suelo derivados de un modelo numérico —no de medición directa—. Actualmente, el producto se encuentra en su segunda versión y sus principales mejoras, respecta a la primera entrega, pueden encontrarse en la precisión en diversas regiones del continente africano. El producto está disponible en el sitio web del *Earth System Research Laboratory* (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpcsoil.html>) como una malla regular con resolución de 0.5° a nivel global, desde enero de 1948, hasta el presente.

2.1.2. Indicadores socioeconómicos

Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego

A través de la Gerencia de Distritos de Riego, la CONAGUA ha publicado anualmente desde 1997 las Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego en forma impresa y electrónica. Además, a partir de 2010 esta información fue incorporada en el portal web de Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego (<http://www.edistritos.com/DR/>), con información a partir del año agrícola 2001-02.

Esta fuente de información ofrece datos de producción agrícola, como la superficie sembrada y cosechada, rendimiento, producción, precio medio rural y valor de producción. Estos campos pueden ser consultados por año agrícola a diferentes niveles de integración (país, organismo de cuenca, estado y distrito de riego).

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

Censos y encuestas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

El INEGI opera una extensa base de datos de indicadores económicos, sociodemográficos y de gobierno derivados de los censos y conteos de población y encuestas temáticas que lleva a cabo de manera periódica. En su plataforma web (<http://www.beta.inegi.org.mx>) es posible acceder abiertamente a registros tabulares y mapas de indicadores asociados a la agricultura, ganadería y forestal, comercio, comercio exterior, comunicaciones y transportes, construcción, educación, empleo y ocupación, empresas y establecimientos, minería, finanzas públicas, gobierno, hogares y vivienda, entre otros dentro de una larga lista.

Catálogo de Datos Abiertos del Gobierno Federal

Además de las fuentes de información mencionadas en esta Subsección, el Gobierno Federal puso en 2015 a disposición del público en general su Catálogo de Datos Abiertos (<https://datos.gob.mx>). Éste consiste en el inventario único de los conjuntos de datos de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, así como por las empresas productivas del Estado (Comisión Federal de Electricidad y Petróleos Mexicanos) descargables en formatos abiertos. Este inventario cuenta con datos en los sectores de gobiernos locales, seguridad y justicia, educación, economía, finanzas, cultura y turismo, desarrollo sostenible, salud e infraestructura.

Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)

El SEDAC pertenece al Sistema de Datos e Información del Sistema de Observación Terrestre (EOSDIS) de la NASA y es operado por el Centro para la Red de Información Internacional de Ciencias de la Tierra (CIESIN) en la Universidad de Columbia (EE. UU.). Tiene la misión de desarrollar y operar aplicaciones que den soporte a la integración de datos socioeconómicos y de ciencias de la Tierra, con especial enfoque en las interacciones humanas en el ambiente natural. Además, busca servir como vínculo entre las geociencias y las ciencias sociales.

Ofrece conjuntos de datos y mapas de indicadores agrícolas, climatológicos, de conservación ambiental, gobernanza, amenazas, salud, infraestructura, uso de suelo, población, pobreza, sustentabilidad, entre otros. Cada producto dentro del SEDAC presenta distintas resoluciones y coberturas

espaciales y temporales y están disponibles gratuitamente en su sitio web (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/>), a través de un registro libre.

2.1.3. Indicadores de gestión de recursos hídricos

Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego

Además de los indicadores de producción agrícola señalados anteriormente, esta fuente de información ofrece datos de estadística hidrométrica. Los campos disponibles son el número de usuarios, superficie física regada y volumen de agua distribuido. Al igual que con los campos de producción agrícola, éstos pueden ser consultados por año agrícola a diferentes niveles de integración.

Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)

El SINA es una base de datos estadística y geográfica que presenta información del sector hídrico en México a través de reportes, gráficos y mapas de la información actual e histórica, disponibles en su sitio web (<http://sina.conagua.gob.mx/sina/>) para consulta y descarga en equipos de escritorio o dispositivos móviles. Los temas de los que ofrece información son el ambiental (por ejemplo, acuíferos, agua renovable, calidad del agua, etc.); económico (agua virtual/huella hídrica, distritos de temporal tecnificado, distritos y unidades de riego, etc.); y social (agua y salud, atención a emergencias, declaratorias de desastre por fenómenos hidrometeorológicos, etc.).

Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

La CONAGUA publica anualmente, desde 1991, la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento con el objetivo de poner a disposición de los interesados, información confiable sobre el tema. Estos reportes incluyen temas como montos de inversión en el subsector; servicios de agua potable y alcantarillado; potabilización, desinfección y tratamiento de agua; y tarifas, facturación y recaudación. El sitio web del Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO; <http://www.pigoo.gob.mx/>), operado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ofrece los vínculos de descarga de indicadores a diferentes niveles de integración (nacional, estatal, por organismo operador y organismo de cuenca). Además, tiene disponibles todos los reportes para descarga en formato electrónico PDF.

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

La Tabla 2-1 presenta un resumen de las fuentes de información disponibles para la evaluación del riesgo de sequía en México. La precisión y calidad de la información contenida en cada una de estas fuentes puede variar en función de la localización y el periodo analizado, por lo que es recomendable llevar a cabo un control de calidad para cada caso en el que se desee aplicar.

2.1. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Tabla 2-1. Resumen de características de las fuentes de información disponibles para la evaluación del riesgo de sequía en México.

Nombre	Cobertura		Resolución	
	Espac.	Temp.	Espac.	Temp.
<i>Variables climatológicas e hidrológicas</i>				
Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN)	México	Variable (1902-2014)	Puntual	Diaria
Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)	México	Variable (1910-2014)	Cuenca	Diaria, Mensual, Anual
50-Year Reconstruction Rainfall Dataset	Global	1948-presente	0.5°×0.5°, 1.0°×1.0°, 2.5°×2.5°	Mensual
Soil Moisture Climate Change Initiative (CCI)	Global	1901-presente	0.5°×0.5°, 1.0°×1.0°, 2.5°×2.5°	Mensual
Global Land Data Assimilation System, version 2 (GLDAS-2)	Global	1948-presente	0.25°×0.25°, 1.0°×1.0°	Trihoraria, Mensual
Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2)	Global	1980-presente	0.5°×0.625°	Horaria, Mensual
CPC Soil Moisture	Global	1948-presente	0.5°×0.5°	Mensual
<i>Indicadores socioeconómicos</i>				
Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego	México	2002-2016	País, Estado, Org. cuenca, Distr. riego	Año agrícola
Censos y encuestas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	México	Variable	País, Estado, Municipio, Otros	Anual
Catálogo de Datos Abiertos del Gobierno Federal	México	Variable	Variable	Variable
Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)	Variable	Variable	Variable	Variable
<i>Indicadores de gestión de recursos hídricos</i>				
Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego (http://www.edistritos.com/DR/)	México	2002-2016	País, Estado, Org. cuenca, Distr. riego	Año agrícola
Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)	México	Variable	Variable	Variable
Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	México	1991-2016		Anual

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

Además de las plataformas y productos de información descritos, el Atlas Nacional de Riesgos (<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx>) cuenta con dos bases de datos referentes a la evaluación del impacto económico y social de los desastres en México. En primer lugar se encuentra la base de datos sobre declaratorias de emergencia, desastre y contingencia climatológica en el periodo 2000-2016. Ésta consiste en un listado de 22,910 declaratorias de diferentes grados de severidad (contingencia, emergencia o desastre) asociados a diferentes eventos de fenómenos climatológicos, entre las que se encuentran 3,750 declaratorias por sequía (998 de tipo desastre). La segunda es una base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México en el periodo 2000-2015. En esta base de datos se incluye información referente a número de defunciones, población afectada, viviendas, escuelas hospitales y áreas de cultivo afectadas por distintos eventos. El listado comprende 6,174 eventos, de los que 145 son sequías. La información derivada de estas dos bases de datos puede resultar útil para generar una función que relacione la intensidad de un evento con los daños esperados.

2.2. Evaluación del riesgo de sequía

En esta sección será propuesta una metodología para evaluar el riesgo de sequía en México que, a la luz del estado del arte en el tema a nivel internacional y la información disponible para el territorio nacional, resulte la más conveniente.

En este sentido, el enfoque que emerge como más apropiado para la evaluación del riesgo es el derivado del modelo PAR propuesto por Wisner *et al.* (2003) que se sintetiza en la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad} \quad (2.1)$$

En un sentido práctico, la gestión de sequías con enfoque de reducción del riesgo requiere una *variable de decisión* que refleje las consecuencias que se esperarían si ocurre un evento de sequía de cierta severidad (Sayers *et al.*, 2016). Por lo tanto, resulta necesario adoptar el enfoque que representa la vulnerabilidad como pérdidas económicas derivadas del déficit de agua.

2.2.1. Evaluación de la vulnerabilidad

Asumiendo que la vulnerabilidad de un sistema ante una sequía es adecuadamente representada por las pérdidas que ésta provoca, su estimación requiere información histórica periódica de variables económicas que reflejen los efectos de la falta de agua en distintos sectores económicos (ver el subcapítulo 1.3). La información disponible en México para un análisis de este tipo se ve limitada a algunos sectores críticos. En este estudio se incluye la evaluación de pérdidas en el sector agrícola. Queda para futuros trabajos el análisis de otros tipos de uso del agua, como el uso público urbano, generación de energía eléctrica, etc.

El sector de uso agrícola del agua en México acapara el 68.2 % del agua para uso consuntivo concesionada en el país. Le siguen, con un 14.5 %, el uso público urbano, y, con un 7.4 %, el uso industrial (CONAGUA, 2016).

El 18 % de la superficie cultivada en el país cuenta con infraestructura de irrigación. Ésta es abastecida con agua concesionada para uso agrícola que suma 65.4 hm³ (agrupando los usos agrícola, acuacultura, pecuario, múltiples y otros), de los que casi 42 provienen de fuentes superficiales (CONAGUA, 2016). En este sentido, aunque el fenómeno de la sequía impacta también las fuentes subterráneas (acuíferos) con sequías hidrogeológicas prolongadas, los efectos en cuerpos de agua superficiales se ven reflejados a mucho más corto plazo y con mayor intensidad.

El resto de la superficie cultivada (75 %) consiste en agricultura de temporal, que depende del régimen de lluvias durante su ciclo de producción y de la capacidad del suelo para captar el agua y conservar la humedad. Esta condición le otorga una particular susceptibilidad a los efectos adversos de las sequías.

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

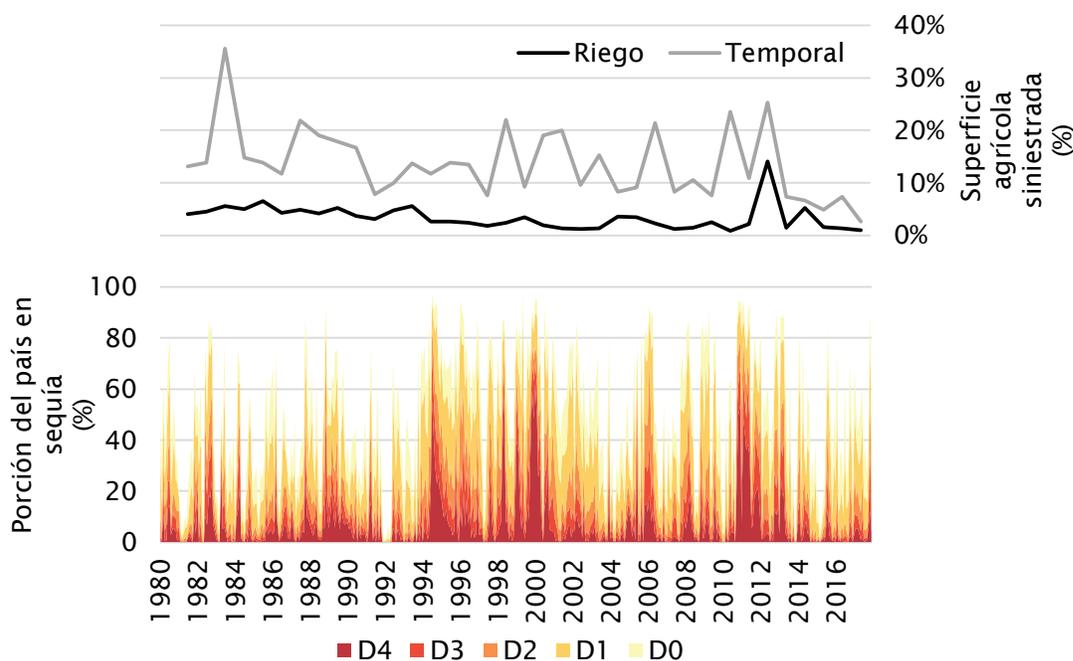


Figura 2-1. Porción de la superficie sembrada siniestrada (incluye todos los tipos de siniestros) y magnitud de sequía en México en el periodo 1980-2017.

La Figura 2-1 muestra en su panel inferior la evolución de la porción del territorio nacional que se ha encontrado en condiciones de sequía con alguna de las cinco clasificaciones de intensidad (ver la Tabla 1-7) durante el periodo 1980-2017. El panel superior presenta la variación del porcentaje siniestrado de la superficie agrícola irrigada y de temporal en el mismo periodo. Dado que no existe información disponible que especifique la superficie afectada por sequías, el gráfico incluye todos los siniestros como fenómenos climáticos, plagas y enfermedades. No obstante, puede identificarse cierta semejanza en las variaciones de ambos paneles, particularmente, para la superficie de agricultura de temporal.

Dada la información disponible para evaluar la vulnerabilidad del sector agrícola ante sequías, el método de la función de daños resulta adecuado para ser aplicado en el contexto de México. Para esto, es posible derivar información del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP; <https://www.gob.mx/siap>).

El SIAP contiene indicadores de producción agrícola, como la superficie cosechada y su rendimiento, a diferentes niveles de integración espacial y temporal. Los registros con niveles de integración más detallados — información mensual por distrito de desarrollo rural (DDR)— son relativamente cortos, ya que iniciaron a partir de 2003 (15 años, hasta el presente). En contraste, los registros más extensos integran los indicadores anualmente a escala estatal con una longitud de 37 años (1980-2016). No obstante que una escala más fina ofrece información más detallada, es recomendable el uso de datos que reduzcan, en la medida de lo posible, la incertidumbre asociada a los resultados de un análisis estadístico. Por lo tanto, se recomienda el uso de la información anual estatal.

Debe ser removida cualquier tendencia en los indicadores de daño (por ejemplo, superficie agrícola siniestrada, reducción en la producción por unidad de superficie cosechada, etc.) para reducir la influencia de factores ajenos a los efectos de la ocurrencia de una sequía. Una forma de llevar a cabo este proceso es ajustando un polinomio de primer orden a los registros y restándole a cada uno el valor que le corresponda de dicha recta.

Una vez eliminada la tendencia de los indicadores de interés, es posible llevar a cabo un análisis de la relación funcional de éstos con el grado de severidad de la sequía.

2.2.2. Evaluación de la amenaza

La magnitud de la amenaza está representada en el modelo PAR por la probabilidad de no excedencia de cierta severidad de un evento. En este sentido, se ha propuesto el uso del Índice Estandarizado Multivariado de Sequía no paramétrico (MSDI; Hao & AghaKouchak, 2014) para evaluar la severidad de los eventos de sequía. La principal ventaja de este índice es que permite incorporar múltiples variables asociadas con la ocurrencia de las sequías (por ejemplo, precipitación, humedad del suelo, escurrimiento) con una metodología simple y cuyos resultados pueden servir para comparar las condiciones de déficit en distintas regiones.

Con ayuda del MSDI, es posible caracterizar los eventos de sequía para llevar a cabo un análisis de frecuencia de los rasgos que reflejen de manera más clara su severidad. Con el objetivo de igualar la escala temporal de la información de impactos —integrada en anualmente, ver el apartado 2.2.1—,

2. SINTETIZAR LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA CALCULAR Y PROPONER MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS PARA EL TERRITORIO MEXICANO, PROPONIENDO INDICADORES QUE PERMITAN SU ESTUDIO, CUANTIFICACIÓN Y MONITOREO EN MÉXICO

Tabla 2-2. Periodos de retorno de diseño más usados y sus probabilidades de no excedencia asociadas.

Periodo de retorno (T; años)	Probabilidad de no excedencia (P)
5	0.80
10	0.90
20	0.95
50	0.98
100	0.99

la severidad, s_a , del déficit de agua en cualquier año a será evaluada anualmente, empleando el déficit mensual acumulado, calculado como sigue:

$$s_a = \sum_{m=1}^{12} (|\text{MSDI}_{m_a}| \times c_{m_a}) \quad (2.2)$$

donde $|\text{MSDI}_{m_a}|$ es el valor absoluto del MSDI en el mes m ($m = 1, 2, 3 \dots 12$), y c_{m_a} es un coeficiente que recibe el valor de 1 ó 0, según la siguiente regla:

$$c_{m_a} = \begin{cases} 1, & \text{si } \text{MSDI}_{m_a} < 0 \\ 0, & \text{si } \text{MSDI}_{m_a} > 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

La probabilidad de no excedencia de los valores de s_a puede ser determinada por medio de un análisis de frecuencia.

Como umbrales para medir la severidad de la amenaza, se propone emplear la serie de probabilidades asociadas a los periodos de retorno de diseño ampliamente usados en los estudios de eventos hidrometeorológicos extremos en México (Tabla 2-2).

3. Revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías y planes de gestión de riesgo ante sequías a nivel internacional

3.1. Introducción

La *gestión del riesgo de desastres* es “el proceso sistemático de utilizar directrices administrativas, organizaciones, destrezas y capacidades operativas para ejecutar políticas y fortalecer las capacidades de afrontamiento, con el fin de reducir el impacto adverso de las amenazas naturales y la posibilidad de que ocurra un desastre” (UNISDR, 2009). Este enfoque reconoce que resulta imposible eliminar de manera definitiva el riesgo y que reducirlo puede afectar otros objetivos sociales (Sayers *et al.*, 2016). Mediante una adecuada gestión de riesgos naturales es posible mitigar las consecuencias de los desastres como las sequías. Para esto, la gestión de riesgos hace uso de distintas medidas de investigación, legales, socioeconómicas, administrativas, entre otras, orientadas a reducir la

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL



Figura 3-1. Elementos de la gestión del riesgo de sequía (Sayers *et al.*, 2016).

intensidad del fenómeno natural y disminuir la vulnerabilidad del sistema expuesto (Osipov, 2010).

Existe una serie de actividades y elementos que se ven beneficiados por la gestión del riesgo de sequías (GRS) y que deben ser considerados en un estudio holístico del tema (ver la Figura 3-1); sin embargo, dados los objetivos de este estudio, se otorgará atención particularmente a la perspectiva de la gestión de recursos hídricos, dejando el resto de las aproximaciones al asunto para estudios posteriores.

3.2. La unidad gestión y las partes interesadas

El análisis del riesgo y su gestión parten de la identificación del *sistema* afectado por la amenaza y sus *subsistemas* y *elementos*. Tratándose del riesgo de sequía, es común adoptar como elemento de análisis a la cuenca de un río. En este sistema pueden distinguirse distintos subsistemas (por ejemplo, el urbano, el agrícola, el industrial), y elementos (tales como las

3.2. LA UNIDAD GESTIÓN Y LAS PARTES INTERESADAS

Tabla 3-1. Elementos del sistema de una cuenca hidrológica agrupados según el modelo S-P-R (Sayers *et al.*, 2016).

Fuentes del riesgo	Senderos del riesgo	Receptores del riesgo
<ul style="list-style-type: none"> • Déficit de precipitación • Alta temperatura • Evapotranspiración • Viento 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuerpos de agua • Flujo de agua subterránea y superficial • Aprovechamientos • Transferencias entre cuencas (trasvases) • Exportación de agua virtual • Humedales y bosques • Ríos 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación hidroeléctrica • Industria • Generación termoeléctrica • Ecosistemas • Suelo agrícola • Áreas urbanas

concentraciones urbanas, dentro del subsistema urbano; o los distritos de riego, dentro del subsistema agrícola) (Tsakiris, 2017).

Los elementos que componen a un sistema sometido a los impactos de la sequía pueden ser clasificados, desde el enfoque del modelo conocido como ‘fuente-sendero-receptor’ (*source-pathway-receptor*, S-P-R), como *fuentes* del riesgo; individuos, organizaciones, grupos sociales, flora o fauna susceptibles a ser dañados por la sequía, es decir, los *receptores*; y los *senderos* que unen a las fuentes con los receptores (Sayers *et al.*, 2016). La Tabla 3-1 presenta los elementos dentro de una cuenca hidrológica agrupados según este modelo.

Dentro de un sistema, existen elementos cuyo adecuado funcionamiento, por la naturaleza de su relación con los recursos hídricos, depende en menor o mayor medida de las condiciones de disponibilidad de agua. A éstos se les conoce, en la práctica de la gestión, como *partes interesadas*. Estos elementos pueden incluir a actores de la sociedad como, por ejemplo (Tsakiris, 2017):

- usuarios del sistema de abastecimiento de agua;
- empresas de servicios públicos de agua;
- agricultores organizados (sindicatos, uniones, confederaciones, etc.);
- empresas turísticas;

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

- empresas industriales;
- autoridades locales;
- organismos meteorológicos e hidrológicos;
- institutos de investigación, capacitación y desarrollo técnico y científico;
- secretarías de Estado o ministerios (de desarrollo rural, medio ambiente, turismo, etc.);
- organizaciones no gubernamentales;
- compañías aseguradoras;
- instituciones bancarias y financieras; y
- académicos y otros expertos.

El trabajo conjunto y colaborativo entre las partes interesadas es necesario para la gestión eficaz del riesgo de sequías. Un ejemplo de esto es la colaboración entre el sector académico y científico y el sector público: es labor de la ciencia impulsar una percepción adecuada del riesgo; sin embargo, las decisiones relativas a la gestión del riesgo son necesariamente políticas (Poljanšek *et al.*, 2017).

Si bien la gestión de sequías hace uso de una serie de resultados y productos de actividades esencialmente técnicas (por ejemplo, monitoreo de variables climatológicas e hidrológicas, determinación de índices e indicadores, operación de sistemas de alerta temprana), la participación de las partes interesadas en las distintas etapas del proceso de gestión del riesgo de sequías es primordial para el éxito de las medidas implementadas.

3.3. Paradigmas de la gestión del riesgo de sequía

El riesgo de sequías ha sido abordado de distintas maneras a lo largo de la historia. Diferentes modelos de gestión han emergido y han sido reemplazados por otros en una constante evolución paralela a los avances en el desarrollo tecnológico. Sayers *et al.* (2016) dividieron dicha evolución en cuatro paradigmas que caracterizaron distintas etapas de la historia: *gestión nómada*, *gestión de desastre*, *gestión de emergencia* y *gestión estratégica*.

Gestión nómada (hasta 10000 a. C.)

Este paradigma asumía a la sequía como un evento al que debía adaptarse. Se distinguió por la forma en que los individuos y comunidades adaptaron sus estilos de vida a los ritmos naturales de la ocurrencia de eventos de sequía. Los grupos eran resilientes en tanto que mantenían una existencia nómada, huyendo de regiones en condiciones de sequía hacia zonas más seguras.

Gestión de desastre (hasta la década de 1950)

Este modelo de gestión concibió a la sequía como un desastre natural inevitable e impredecible que debía ser tolerado. Como tal, toda acción orientada a mitigar los impactos de la sequía era adoptada posterior a la ocurrencia de un evento, esencialmente enfocadas en atender problemas inmediatos y locales para asegurar el abasto de agua potable y evitar crisis alimenticias.

Gestión de emergencia (hasta la década de 2000)

Durante el periodo en que prevaleció esta pauta, la sequía fue entendida como una amenaza a la que es factible monitorizar, pronosticar y hacer frente. Este periodo vio el nacimiento de una gran cantidad de instrumentos para la cuantificación de la sequía, así como de sistemas de monitorización y alerta temprana, que permitieron prever en cierta medida el desarrollo de un evento. Se extendió el uso de alertas de sequía y comenzaron a adoptarse medidas para limitar las pérdidas derivadas de su ocurrencia. Se otorgó especial atención a la recuperación de sectores clave de la sociedad, como el agrícola, a través de compensaciones financieras. A partir de este paradigma, se comenzó a dar importancia al factor ambiental mediante la adopción de medidas reactivas de protección a especies y servicios ecosistémicos prioritarios.

Gestión estratégica (presente)

Este enfoque, en actual desarrollo, consiste en un proceso de planeación, respuesta y recuperación, basado en el riesgo de sequía a largo plazo. Se asienta sobre dos pilares principales: la implementación de estándares de seguridad y la asimilación del riesgo. El primero, a través de reglas de restricción del uso de agua, aseguramiento de infraestructura con capacidad de almacenamiento de reserva, y la incorporación del flujo de agua necesario para la protección de los ecosistemas. El segundo, por medio de una amplia cartera de medidas

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

de preparación, respuesta y recuperación; un mejor uso de los recursos; y la comprensión y gestión de los impactos de los eventos de sequía.

En la actualidad, la GRS debe estar orientada a la identificación, selección y priorización de las medidas o combinaciones de medidas más apropiadas para mejorar la concientización de la población, construir capacidades del sistema —principalmente, a través de la educación— desarrollar sistemas de alerta temprana, promover programas de aseguramiento, etc. (Tsakiris, 2017).

3.4. La Gestión Estratégica del Riesgo de Sequía

La gestión de las sequías ha evolucionado como respuesta a la experiencia de eventos registrados, avances en la ciencia y cambios filosóficos en el tema (ver la Subsección 3.3). En este sentido, la *Gestión Estratégica del Riesgo de Sequía* (SDRM, por sus siglas en inglés) es una compensación entre los distintos enfoques desde los que puede ser abordado el asunto. Tiene el objetivo de desarrollar resiliencia a la sequía sobre la base de cuatro fases de la gestión del riesgo. A saber:

1. *Resistir* los impactos dañinos de la ocurrencia de una sequía a través de atender necesidades individuales, proteger los servicios ecosistémicos y minimizar los impactos económicos.
2. *Recuperarse* rápidamente de un evento de sequía, usando una limitada ayuda de emergencia.
3. *Adaptarse* al cambio por medio de un proceso continuo de constantes ajustes moderados.
4. *Transformar* a la sociedad a través de la visión y habilidad necesarias para realizar cambios radicales en las políticas y lograr limitar el riesgo y maximizar las oportunidades.

Las primeras dos fases son derivadas de la noción de *resiliencia reactiva*, que propone mantener el estado actual del sistema para lograr un objetivo de consistencia y estabilidad. Por otro lado, las últimas dos fases se identifican dentro de la noción de *resiliencia proactiva*, que reconoce que el cambio es inevitable y que el sistema alcanzará la resiliencia solamente si es capaz de realizar los cambios necesarios (Sayers *et al.*, 2017).

3.4. LA GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL RIESGO DE SEQUÍA

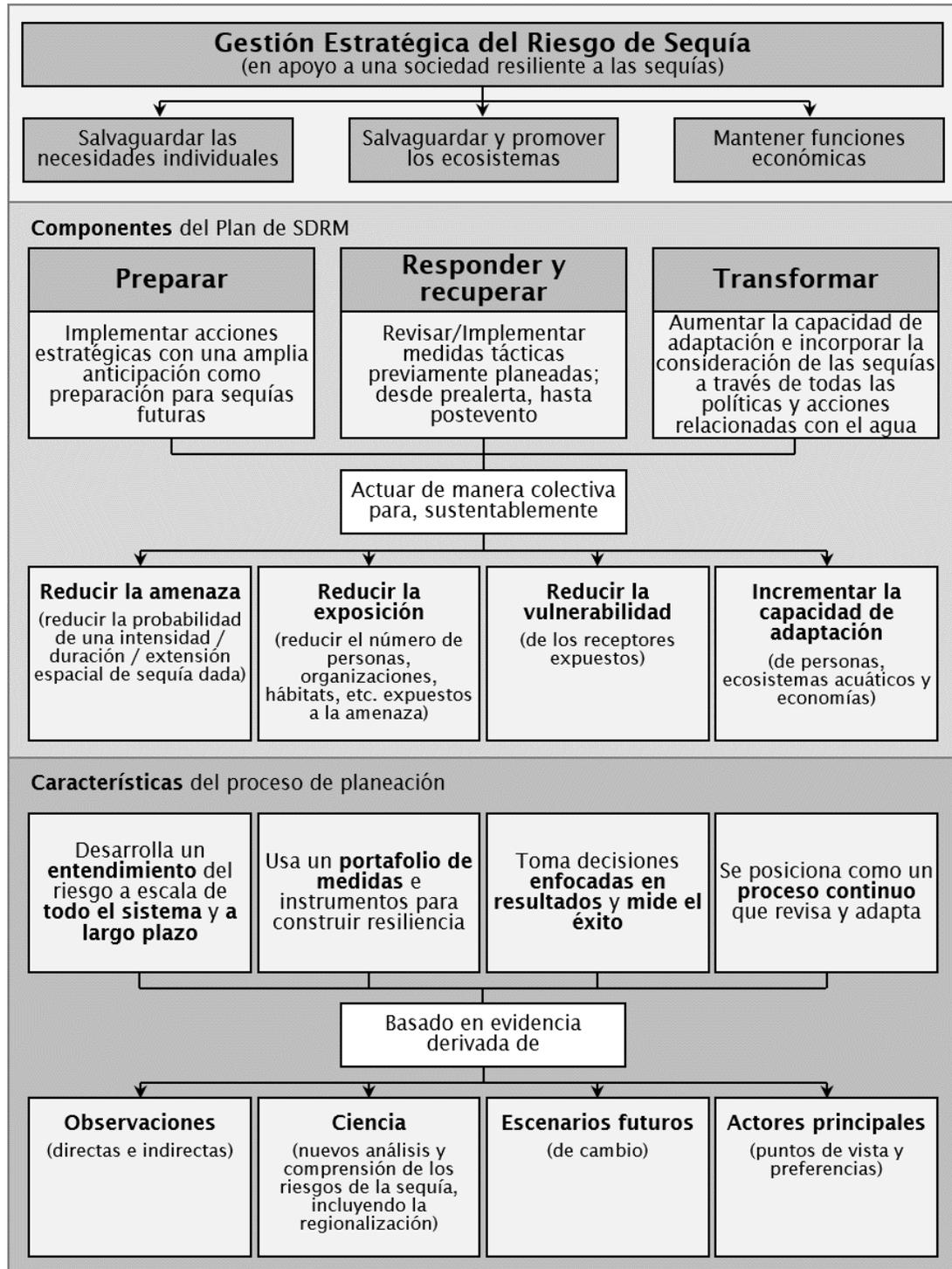


Figura 3-2. Marco de trabajo del modelo de Gestión Estratégica del Riesgo de Sequía (Sayers *et al.*, 2017).

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

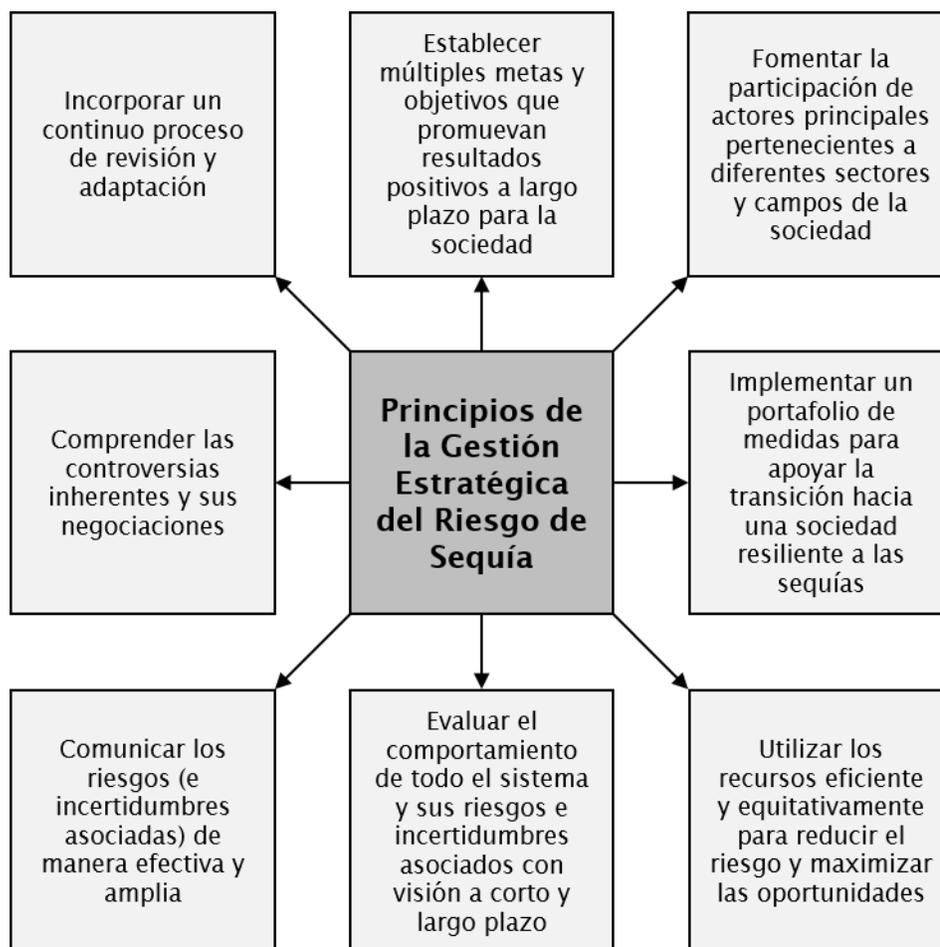


Figura 3-3 Principios rectores de la Gestión Estratégica del Riesgo de Sequía (Sayers *et al.*, 2017).

La SDRM incorpora un enfoque holístico multiescalar del riesgo (desde corto hasta largo plazo y desde una visión local hasta una regional) y usa múltiples acciones para generar múltiples resultados. La Figura 3-2 resume el marco de trabajo en el que se basa este modelo.

Los autores de este enfoque señalan una serie de principios rectores indispensables para una exitosa implementación del modelo. Éstos son resumidos en la Figura 3-3 y descritos a continuación.

Establecer múltiples metas y objetivos que promuevan resultados positivos a largo plazo para la sociedad

La SDRM intenta reducir el impacto de la sequía en muchas secciones de la sociedad y salvaguardar los servicios ecosistémicos en los que éstas dependen. Además, ofrece resultados a largo plazo y evita la

búsqueda de soluciones a corto plazo que puedan tener impactos negativos a largo plazo. Por lo tanto, el éxito de este modelo está en función de múltiples objetivos que son alcanzados a través de distintas escalas temporales.

Fomentar la participación de las partes interesadas pertenecientes a diferentes sectores y campos de la sociedad

El paradigma planteado por la SDRM consiste en un esfuerzo colectivo, por lo que considera que la participación activa de los sectores público, privado y sociedad civil es indispensable para tomar mejores decisiones. La SDRM promueve un marco de trabajo de colaboración que apoya el desarrollo del impulso político necesario para cambiar y compartir tanto la responsabilidad como el estímulo fiscal a través de múltiples sectores.

Implementar un portafolio de medidas para apoyar la transición hacia una sociedad resiliente a las sequías

Las medidas contempladas por la SDRM incluyen aquellas relacionadas con los procesos naturales (por ejemplo, ralentizar el flujo para propiciar la recarga de acuíferos y mantener cuerpos de agua naturales) en conjunto con la construcción de infraestructura gris (en los casos en que sea necesaria) y soluciones no estructurales para reducir la probabilidad de ocurrencia de sequías y sus consecuencias en el corto y largo plazo. Esto requiere, por una parte, incentivar a los individuos y empresas a adaptarse autónomamente a la sequía, y, por otra, exigir acciones a través de instrumentos legales y regulatorios.

Utilizar los recursos eficiente y equitativamente para reducir el riesgo y maximizar las oportunidades

El modelo considera que la conveniencia de las medidas de gestión debe ser medida, no solamente en términos de la reducción del riesgo alcanzada y los recursos requeridos para su implementación (análisis costo-beneficio), sino, además, en función de la equidad de sus impactos y su potencial para maximizar las oportunidades del ecosistema.

Evaluar el comportamiento de todo el sistema y sus riesgos e incertidumbres asociados con visión a corto y largo plazo

El riesgo de sequías está compuesto por una fuente climática, los senderos hidrológicos y los receptores que pueden experimentar un

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

impacto negativo (es decir, personas, ecosistemas y economías; ver la Subsección 3.2). La adecuada selección de medidas tiene como prerrequisito una apropiada comprensión de la totalidad del sistema y la forma en que podría cambiar en el futuro. Asimismo, es necesario conocer la incertidumbre asociada a la información y los modelos para tomar decisiones robustas.

Comunicar los riesgos (e incertidumbres asociadas) de manera efectiva y amplia

La comunicación efectiva del riesgo (y sus incertidumbres) en forma clara y accesible permite a individuos y comunidades prepararse apropiadamente y respaldar medidas para la reducción del riesgo cuando sea necesario. Iniciar el diálogo durante una sequía es demasiado tarde.

Comprender las controversias inherentes y sus negociaciones

Durante la implementación de una SDRM, inevitablemente aparecerán conflictos entre las partes interesadas. El modelo otorga una alta importancia a comprender y conciliar oportunamente estas controversias ya que considera que las decisiones tomadas precipitadamente, durante un evento de sequía, difícilmente alcanzará un balance adecuado de las necesidades que compiten entre sí por el recurso.

Incorporar un continuo proceso de revisión y adaptación

La SDRM continuará generando los resultados deseados solamente si se concibe la gestión del riesgo de sequías como un proceso continuo de revisión y adaptación. Esto resulta indispensable en un escenario en el que las proyecciones de condiciones futuras están delineadas a partir del conocimiento del pasado y presente.

3.5. La gestión del riesgo de sequía en el mundo

El enfoque de la gestión de sequías varía en función de las necesidades particulares de los retos enfrentados en cada país, así como de las condiciones climáticas y los contextos político, institucional y cultural. En esta Subsección, se describirá la forma en que cuatro países distintos abordan este tema.

3.5.1. Australia

La combinación de sus condiciones áridas, la alta variabilidad de su precipitación anual, y su economía dominada por las actividades agrícolas, han propiciado que la sociedad australiana, en particular el sector agrícola, cuente con una gran experiencia en la gestión de las sequías.

En 1992, Australia adoptó una nueva Política Nacional de Sequía (NDP). Este nuevo enfoque representó una evolución de un enfoque de manejo de crisis hacia una gestión de la sequía basada en el riesgo climático. Su énfasis radica en la autosuficiencia a través de reconocer a las sequías como una parte natural del entorno y para la que los ciudadanos deben estar preparados. Los principios que orientan a la NDP son:

1. Los productores primarios deben adoptar un enfoque de autosuficiencia para manejar la variabilidad climática.
2. Los recursos agrícolas y ambientales deben ser mantenidos y protegidos durante periodos de estrés climático extremo.
3. Las industrias agrícolas y rurales deben recuperarse de una sequía tan pronto como sea posible, consistentemente con los niveles de sustentabilidad a largo plazo.

La última reforma mayor en la gestión de los recursos hídricos en Australia comenzó en la década de 1990, como respuesta a un evento importante de sequía que afectó gran parte de Queensland y New South Wales. No obstante, fue hasta 2007, derivado de la experiencia de la llamada *Sequía del Milenio*, que el gobierno federal introdujo importantes medidas para incrementar la capacidad del país de hacer frente a las sequías con el Plan Nacional para la Seguridad Hídrica. Este Plan Nacional consideró acciones para mejorar el manejo del agua, en particular, en el sector de irrigación, a través de la modernización de la infraestructura de riego y su operación, la reducción de la sobreasignación del recurso mediante la readquisición de concesiones de agua, y una mayor inversión en información acerca del recurso. Asimismo, se establecieron medidas para mitigar los impactos de la sequía en el entorno urbano por medio del desarrollo de fuentes de abastecimiento independientes del clima (como la desalinización), sistemas de abastecimiento de agua más rigurosos, reformas institucionales para delinear mejor las responsabilidades de abastecimiento de agua, y cambios

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

en la forma en que los proveedores del servicio definían la confiabilidad y niveles de suministro (Sayers *et al.*, 2016).

3.5.2. Brasil

La responsabilidad de la planeación y gestión de sequías en Brasil recae en su Agencia Nacional de Aguas (ANA). Las principales medidas que esta Agencia ha adoptado para hacer frente a estos eventos han consistido en programas de transferencias de agua y construcción de presas, así como otras referentes a mejorar la eficiencia y la asignación del aprovechamiento del recurso.

El modelo de gestión de la sequía en este país ha sido, históricamente, responder ante las emergencias y la construcción de grandes proyectos de obras hidráulicas. Este enfoque le ha permitido a Brasil amortiguar a los sistemas contra reducciones en la disponibilidad del agua; sin embargo, aún persisten los impactos más significativos derivados de la sequía.

Recientemente, se han llevado a cabo algunos esfuerzos orientados a abandonar el modelo de respuesta reactiva ante las sequías y su alta dependencia en soluciones estructurales para mitigar los impactos de la sequía. Por ejemplo, se ha mejorado el monitoreo de la sequía y se ha descentralizado y democratizado la gestión de los recursos hídricos (Sayers *et al.*, 2016).

3.5.3. Estados Unidos de América

Actualmente, no existe una política nacional para la sequía en los EE. UU. Esto ha propiciado una gran diversidad en los planes desarrollados en cada estado a partir de la década de 1980. Desde la década de los noventa, algunos estados han mostrado un importante desarrollo en materia de prevención de sequía, centrado en el desarrollo del componente de monitoreo y alerta temprana (Botterill y Hayes, 2012). Este progreso puede ser atribuido en gran medida a tres factores clave que han concientizado a la sociedad acerca del peligro que representan estos eventos (WMO y GWP, 2014): (i) desde 1996, casi todo el país se ha visto afectado por sequías significativas con duraciones, en algunos casos, de hasta siete años consecutivos; (ii) el aumento de impactos de la sequía y el creciente número de sectores afectados, así como los conflictos entre éstos por la competencia por el recurso; y (iii) la creación, en 1995, del *National Drought Mitigation*

Center (Centro Nacional de Mitigación de la Sequía, NDMC) en la Universidad de Nebraska.

No obstante lo anterior, la mayoría de los estados basan su gestión de sequía en el manejo de la crisis (Sayers *et al.*, 2016). Por ejemplo, el Plan de Contingencia por Sequías de California reconoce la necesidad de un enfoque proactivo para gestionar el riesgo de sequía, pero incluye solo unas pocas medidas de preparación. El Plan de Nuevo Hampshire identifica a la sequía como un peligro asociado a la salud, pero no incluye medidas específicas para hacerle frente.

3.5.4. Sudáfrica

Una de las principales vocaciones económicas de Sudáfrica es la agricultura, lo que la permite exportar a países vecinos casi un millón de toneladas de alimentos al año. Sin embargo, sequías severas, como la ocurrida en 2016, orillan al país a importar una gran cantidad de alimentos.

La respuesta ante las sequías en Sudáfrica, desde la década de 1920, ha sido concebida como una intervención posterior a la ocurrencia del evento, basada en un enfoque agrícola. Las medidas adoptadas incluyen el cambio de uso de suelo y el manejo del suelo y prácticas agrícolas (como la cría de ganado en establos).

No obstante, en la década de los noventa tuvo lugar una crisis por sequía y, de manera simultánea, un cambio en el régimen de gobierno del país, lo que resultó en la creación del Foro Consultivo Nacional sobre la Sequía, que amplió el enfoque de atención a la dimensión de desarrollo que tiene la sequía, e incluyó la participación de distintos actores principales, como la sociedad civil, sindicatos, agricultores organizados, etc.

Sudáfrica cuenta con una legislación específica para la reducción de riesgos de desastres (el Acta Nacional de Gestión de Desastres), que ha evolucionado a través de las décadas, especialmente con el inicio del régimen democrático en 1994. Entre las recomendaciones del Acta, se urge a las provincias, individuos y agricultores a evaluar los riesgos y prevenir la ocurrencia de desastres a través del uso de información de alerta temprana y la implementación de medidas preventivas, como el uso de sistemas de irrigación eficientes, o establecer esquemas de ahorro de agua. Además, enfatiza la necesidad de contar con infraestructura funcional en todo el país

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

Tabla 3-2. Umbrales del *European Drought Observatory* (EDO) para definir las categorías de sequía (Sepulcre-Canto et al., 2012).

Categoría	Definición
Observación	SPI-03 < -1
Precaución	SPI-03 < -1; Anomalía pF > 1
Alerta	SPI-03 < -1; Anomalía fAPAR < -1
Alerta 2	SPI-03 < -1; Anomalía pF > 1; Anomalía fAPAR < -1

pF es la succión del suelo. fAPAR es la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida y representa la fracción de energía solar que es absorbida por la vegetación.

Tabla 3-3. Umbrales del Observatorio de Sequía de Chile para definir las categorías de sequía (www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/Monitoring).

Categoría	Definición
Alerta 1	SPI-06 < -0.84
Alerta 2	ICE-06 < -0.84
Alerta 3	Anomalía de NDVI < -0.50

SPI-06 es el Índice Estandarizado de Precipitación estimado para una escala temporal (ventana de agregación) de seis meses; ICE-06 es el Índice de Índice Estandarizado de Ecurrimiento estimado para una escala temporal (ventana de agregación) de seis meses; NDVI es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

que pueda mitigar los impactos de las sequías, como una red (sistema) de presas, una amplia capacidad de almacenamiento de agua, e infraestructura para la transferencia intracuenca para trasladar agua de regiones con exceso a regiones con déficit durante sequías.

Además de lo anterior, existen importantes avances observados en el pronóstico de sequías en África durante las últimas décadas. No obstante, estos instrumentos no se han traducido en la implementación de medidas preventivas contempladas (Baudoin *et al.*, 2017).

3.6. Definiciones de etapas de sequía

Las medidas de gestión de sequía adoptadas en determinado momento relativo a la ocurrencia de un evento deben corresponder con la definición de distintas etapas de alerta. Los umbrales que cada país emplea para definir el inicio de cada etapa son muy diversos, lo que resulta natural si se considera, además, que cada uno define la sequía a través del índice o conjunto de índices que mejor se adapte a sus necesidades. La Tabla 3-2 y la Tabla 3-3 muestran, como ejemplo, los criterios adoptados por el *European Drought Observatory* (Observatorio Europeo de Sequía, EDO);

edo.jrc.ec.europa.eu) y el Observatorio de Sequía de Chile (www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/Monitoring).

En la literatura se reportan diversas clasificaciones del grado de alerta; no obstante, una clasificación general puede dividir las condiciones de déficit en etapa normal, prealerta, alerta y emergencia (GWP-CEE, 2015). En este trabajo se ha propuesto la adopción de dicha nomenclatura y el uso de las probabilidades de ocurrencia de diseño incluidas en la Tabla 2-2 (Sección 2) como umbrales para identificar el inicio de las distintas etapas de alerta. Este esquema es descrito en la Sección 4.

3.7. La gestión del riesgo de sequía en México

En México, la responsabilidad del diagnóstico de los problemas asociados a la disponibilidad de agua en cada región y la implementación de estrategias para la gestión de la sequía corresponde a los 26 Consejos de Cuenca. En términos generales, estas estrategias se enfocan en (Sayers *et al.*, 2016):

- Mejorar el monitoreo permanente de la lluvia y las condiciones climáticas.
- Implementar programas federales para proveer recursos económicos a los estados, municipios y distritos y unidades de riego destinados a mejorar el uso y reúso del agua.
- Acceder a apoyos federales para implementar medidas en casos de emergencia, como abastecimiento de agua a través de plantas de tratamiento portátiles, implementación del monitoreo de la salud y medidas de protección, perforación y operación de emergencia de pozos, y rehabilitación y renovación de infraestructura hidráulica.

3.7.1. Marco normativo e institucional mexicano

En parte se ha incluido una revisión del marco normativo e institucional mexicano que cuenta dentro de sus funciones u objetivos alguna consideración referente a la gestión de las sequías.

Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales (Presidencia de la República, DOF: 24-03-2016), reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales, contempla una serie de

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

medidas para hacer frente a la disminución de disponibilidad de agua debida a una sequía.

Esta Ley señala que toda concesión para la extracción de aguas nacionales está sujeta a condiciones particulares ante la ocurrencia de una sequía (y otros fenómenos). Incluso, otorga facultades a la Autoridad del Agua (el Organismo de Cuenca) para atraer temporalmente los derechos contenidos en un título de concesión de agua “para que atienda sequías extraordinarias”. Por otra parte, contempla la determinación de medidas necesarias para controlar (o vedar) la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales durante una sequía extraordinaria mediante la emisión de un decreto del Ejecutivo Federal.

Asimismo, otorga a los Consejos de Cuenca la responsabilidad de “concertar las prioridades de uso del agua con sus miembros y con el Organismo de Cuenca que corresponda”; sin embargo, establece que “en todos los casos tendrán prioridad el uso doméstico y el público urbano”.

Comisión Nacional del Agua

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es designada por la Ley de Aguas Nacionales como “Órgano Superior en materia de gestión integrada de los recursos hídricos”, lo que incluye la definición de estrategias para la adaptación a la ocurrencia de sequías. Dentro de dicho Órgano, todas las funciones relativas a la gestión de sequías están concentradas en la Subdirección General Técnica, distribuidas en sus gerencias de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) y de Aguas Subterráneas (GAS) (SEMARNAT, DOF: 22-04-2015).

La GASIR es responsable de “la realización de análisis hidrológicos de escurrimientos en situación de escasez extrema que permitan prever y detectar sequías, a fin de tomar medidas oportunas para su adecuada atención”. Asimismo, está facultada para “coordinar los procesos para mantener el monitoreo continuo sobre la evolución de las variables meteorológicas, principalmente las que afectan la disponibilidad de agua, identificando zonas en estado de sequía”.

Por otra parte, la Gerencia de Aguas Subterráneas (GAS) cuenta dentro de sus funciones con la de “apoyar en la ejecución de acciones para la atención de emergencias generadas”, entre otros incidentes, por sequías.

Programa Nacional Hídrico 2014-2018

El Programa Nacional Hídrico 2014-2018, instrumento de planificación para la seguridad y sustentabilidad hídrica en México (CONAGUA, 2013), incluye dos objetivos paralelos al desarrollo de la gestión del riesgo de sequía en el país: “Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua” e “Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones”. Estos objetivos son perseguidos mediante distintas estrategias y líneas de acción destinadas al manejo del riesgo de sequía, mismas que se describen en la Tabla 3 1.

El seguimiento y evaluación de los impactos de estas acciones es cuantificado en términos de dos indicadores: cantidad de cuencas con decreto de reserva de agua para uso ambiental y cantidad de consejos de cuenca con programa de manejo de sequía. La Tabla 3-5 presenta la periodicidad de evaluación y la meta de estos indicadores.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

Tabla 3-4. Líneas de acción para la gestión de sequías contempladas por el Programa Nacional Hídrico 2014-2018

Objetivo	Estrategia	Líneas de acción
Fortalecer la gestión integrada y sustentable del agua	Modernizar e incrementar la medición del ciclo hidrológico	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecer y modernizar la medición del ciclo hidrológico en el ámbito nacional, regional y local.
Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones	Proteger e incrementar la resiliencia de la población y áreas productivas en zonas de riesgo de inundación y/o sequía	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar el Programa Nacional Contra las Sequías (PRONACOSE). • Fortalecer o en su caso crear grupos especializados de atención de emergencias capacitados y equipados. • Actualizar las políticas de operación de las presas privilegiando la protección de los centros de población. • Fortalecer los sistemas de alerta temprana y las acciones de prevención y mitigación en caso de emergencias por fenómenos hidrometeorológicos. • Realizar acciones de restauración hidrológica ambiental en cuencas hidrográficas prioritarias.
	Reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático o variabilidad climática	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar la participación y corresponsabilidad de estados y municipios para acciones de adaptación frente al cambio climático o variabilidad climática. • Crear o fortalecer fondos financieros para la adaptación al cambio climático y para el mantenimiento y rehabilitación de infraestructura hidráulica. • Incrementar el intercambio de información con instancias nacionales e internacionales.

3.7. LA GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA EN MÉXICO

Tabla 3-5. Indicadores para la evaluación de los impactos de las líneas de acción para la gestión de sequías contempladas por el Programa Nacional Hídrico 2014-2018.

Indicador	Periodicidad	Línea base (2012)	Meta (2018)
Decretos de reserva de agua para uso ambiental formulados (cuencas con decreto publicado)	Bianual	0	189
Programas de manejo de sequías elaborados y aprobados por consejos de cuenca	Anual	0	26

Resulta interesante que este Plan define a la sequía como la “ausencia prolongada o escasez marcada de precipitación”. Este enfoque del fenómeno deja fuera de todo análisis a otras variables ambientales que tienen también una influencia importante en los impactos socioeconómicos de una sequía, como la humedad del suelo y el escurrimiento y almacenamiento en cauces y cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Programa Nacional contra la Sequía

El Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE) tiene como objetivos elaborar los programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel de cuenca (o grupos de cuencas), desarrollar capacidades en instituciones locales, y coordinar y ejecutar acciones para mitigar los impactos de durante eventos sequías (CONAGUA, 2014). Constituye el eje principal de la política pública para la atención de las sequías en México desde 2014, al ser puesto en marcha.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL



Figura 3-4. Principios y componentes básicos de operación del PRONACOSE.

Los principios que orientan los objetivos de esta política pública, sintetizados en la Figura 3-4, responden a la evolución de los modelos de gestión observados en distintas partes del mundo y están orientados a establecer el paradigma de la Gestión Estratégica del riesgo de sequía.

El PRONACOSE señala la necesidad de una gestión del riesgo de sequías a través de una estrategia de dos frentes. Por un lado, contempla la ejecución de medidas preventivas, como el monitoreo y alerta temprana; por otro lado, ataja la necesidad de mitigar los impactos de la sequía durante e inmediatamente después de un evento.

3.7. LA GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA EN MÉXICO

En este Programa, la prevención del riesgo de sequía se sostiene sobre seis pilares: el monitoreo y alerta temprana, los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS) regionales, el fortalecimiento del marco legal coordinación institucional, capacitación, comunicación y divulgación e investigación. Por otro lado, contempla fortalecer la respuesta y medidas de mitigación a través de una Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones (CIASI), actos de autoridad, programas y fondos federales y la activación de protocolos de emergencia.

El Documento Rector del Programa presenta una minuciosa definición de la sequía. Considera que la sequía ocurre debido a una menor cantidad de lluvia o un retraso en su ocurrencia, pero también menciona las clasificaciones de este evento cuando sus efectos se observan en otras variables del sistema hidrológico. Además, adopta y describe cinco rangos cualitativos de intensidad: Anormalmente seco (D0), Sequía Moderada (D1), Sequía severa (D2), Sequía Extrema (D3) y Sequía Excepcional (D4).

Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones

Paralelamente a la creación del PRONACOSE, fue establecida por la Presidencia de la República la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones (CIASI; Presidencia de la República, DOF: 05-04-2013) para dar seguimiento y coordinar las labores del Ejecutivo Federal orientadas al manejo de las sequías. La CIASI es presidida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e integrada por los titulares de la Secretaría de Gobernación (SEGOB), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), la Secretaría de Marina (SEMAR), la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la Secretaría de Energía (SENER), la Secretaría de Economía (SE), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Salud, la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y la CONAGUA.

Entre las funciones de la CIASI, se encuentran las de formular y someter a consideración del Presidente de la República las políticas y estrategias nacionales en materia de sequías e inundaciones, y su eventual incorporación en los programas sectoriales; definir y coordinar la

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

instrumentación de las estrategias nacionales en materia de sequías e inundaciones; establecer las medidas preventivas, de atención y mitigación de impactos de fenómenos meteorológicos extraordinarios; e impulsar el desarrollo de proyectos de investigación sobre sequías e inundaciones y difundir sus resultados.

Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía

En 2013, universidades de distintos lugares del país y los 26 consejos de cuenca desarrollaron los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS) de cada Consejo de Cuenca.

Los PMPMS incluyen la revisión histórica de eventos ocurridos en cada región, la evaluación de su vulnerabilidad, medidas para mitigar y responder ante la ocurrencia de un evento, la definición de distintas etapas de sequía e instrumentos administrativos que permiten medir su ejecución e incorporar mejores prácticas.

Gestión de la sequía en las entidades federativas

Durante la revisión del marco normativo e institucional del país, fueron recopiladas algunas leyes, reglamentos y programas sectoriales en distintos estados de la república. Este apartado hace una breve descripción de lo que cada uno contempla orientado a la gestión del riesgo de sequías.

El Programa Sectorial 2011-2016 del estado de Chihuahua señala como uno de sus nueve objetivos principales “desarrollar procedimientos para la prevención y protección de la población civil ante riesgos causados por el clima” (Gobierno del Estado de Chihuahua y JCAS, 2011). Sin embargo, en lo tocante a la sequía, se limita a fomentar su investigación científica.

En la Ciudad de México, la Ley de Aguas del Distrito Federal ordena reglamentar el uso de las aguas para establecer limitaciones a los derechos existentes por escasez, sequía o condiciones extraordinarias (Gobierno del Distrito Federal y SACMEX, 2012).

En el estado de Durango, prevenir “los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos”, así como “atender sus efectos” son uno de los ocho objetivos planteados en el Programa Hídrico Visión 2030 (CONAGUA, 2009a). En lo respectivo a la sequía, dicho documento plantea alcanzar este objetivo mediante la formulación de cinco planes de

3.7. LA GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA EN MÉXICO

contingencia por sequía en cuencas prioritarias estatales (incluidas las de los ríos Nazas y San Pedro) para el horizonte de planeación. Además, propone “fomentar en la población duranguense una cultura de prevención y atención de emergencias que incluya información sobre las causas y efectos del cambio climático”.

Entre los principios básicos en el manejo del agua en Jalisco contenidos en el Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco (CONAGUA, 2009b), se contempla la disminución de riesgos y la atención a las causas y los efectos de inundaciones y sequías. No obstante, las estrategias establecidas para trabajar por dicho principio están esencialmente orientadas a la mitigación de los efectos de las inundaciones y omiten la atención a los impactos derivados de las sequías.

En Michoacán, El Programa Hídrico Visión 2030 (CONAGUA, 2009c) considera, como parte de sus mecanismos de regulación, la implementación de ‘bancos de agua’, que consisten en la transferencia o arrendamiento de derechos de agua entre usuarios y que puede contribuir en la reducción del impacto de las sequías. Su funcionamiento, en términos generales, consiste en comprar agua en periodos de abundancia y venderla en épocas de déficit. Asimismo, el Programa tiene la meta de implementar dos planes de contingencia por sequía para sus organismos de cuenca para el 2030.

El Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Morelos (PEACCMOR; Poder Ejecutivo del Estado de Morelos, PO: 5268) incluye en sus medidas de adaptación del sector agrícola el “uso de especies o variedades agrícolas capaces de resistir los efectos del cambio climático” (en particular, cambios de temperatura, sequías, inundaciones y salinización del suelo). Por otro lado, incluye establecer un sistema de alerta temprana de eventos hidrometeorológicos extremos con el objetivo, entre otros, de reducir enfermedades derivadas de este tipo de desastres. Estas afecciones, en el caso de la sequía, impactan principalmente en el sistema respiratorio.

La Ley de Aguas del Estado de Tamaulipas (Poder Legislativo del Estado de Tamaulipas, PO: 21-12-2016) dedica un capítulo al “control de avenidas y protección contra inundaciones, sequías y otros fenómenos extremos”. No obstante, se limita a otorgar a la Comisión Estatal del Agua de Tamaulipas la responsabilidad de intervenir “en las actividades de seguridad hidráulica en

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS Y PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A NIVEL INTERNACIONAL

el ámbito estatal [y establecer] programas de contingencia para prevenir los efectos de” las sequías, entre otros fenómenos extremos. Así mismo, señala como responsabilidad de dicha Comisión “generar conciencia en la población [de] que el elemento agua es un recurso vital, escaso y finito que debe aprovecharse con racionalidad y eficiencia; propiciar la prevención y control de la contaminación”, entre otras medidas orientadas al uso eficiente y cuidado del agua.

La Ley del Cambio Climático para el Estado de Zacatecas y Municipios (Poder Legislativo del Estado de Zacatecas, POG: 23-09-2015) señala a la Secretaría del Campo de dicho estado como responsable de “formular, regular, dirigir y participar en la instrumentación de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático en materia de sequía en regiones del estado vulnerables a este fenómeno”. Por otro lado, instruye al Estado y los Municipios a “fomentar la recarga de acuíferos, la tecnificación de la superficie de riego”, la adopción de prácticas sustentables de agricultura, ganadería, pesca y acuicultura, y la implementación de sistemas de alerta temprana con pronósticos de sequía, “especialmente en zonas áridas o semiáridas del estado”. Así mismo, esta Ley contempla la protección de la población, como criterio general para la adaptación al cambio climático, priorizando, entre otras, a las zonas “susceptibles a sufrir las sequías”.

4. Desarrollo de un Plan de Gestión de Riesgo ante Sequías

4.1. Introducción

Contando con las bases establecidas en las secciones anteriores, derivadas de una revisión del estado actual de la práctica internacional en materia de cuantificación y gestión del riesgo de sequía, en esta sección se propone una serie de criterios y recomendaciones para la implementación de un modelo de Gestión Estratégica del Riesgo de Sequías en México.

4.2. Sistema de indicadores de sequía

La definición de un sistema de indicadores de sequía permite identificar y evaluar la gravedad de las condiciones de déficit. Este sistema debe considerar múltiples variables, dada la complejidad de la variabilidad de la sequía causada por las condiciones climáticas y geográficas y la propagación de la sequía a través del sistema hidrológico de una cuenca.

4.2.1. Índices y tipos de sequía

En otras secciones de este documento fueron ya descritas las bondades del uso de índices estandarizados de sequía. Este Plan hace uso de dicho enfoque como base para identificar los eventos dentro del país y sus características. La metodología para su cálculo le da una gran versatilidad y

le permite ser aplicado a distintas variables ambientales, para reflejar los diferentes tipos de sequía a través de la(s) variable(s) que mejor refleje su comportamiento. Además, dado que este índice es normalizado, es posible aplicarlo en cualquier régimen hidrológico y zona climática y llevar a cabo comparaciones entre éstos.

A continuación, son determinados los indicadores más apropiados para la evaluación de cada tipo de sequía.

Sequía meteorológica

Generalmente evaluada en función de la cantidad de precipitación registrada, la sequía meteorológica puede ser medida con base en el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee *et al.*, 1993).

Sequía agrícola

A este tipo de sequía están asociados los efectos del déficit de agua en la calidad y cantidad de producción agrícola. Por esto, es común evaluarla a partir de registros de humedad del suelo, variable directamente ligada al desarrollo de los cultivos en sus diferentes etapas de crecimiento. La sequía agrícola puede ser monitoreada con ayuda del Índice Estandarizado de Humedad del Suelo (SSI; Hao y AghaKouchak, 2013).

Sequía hidrológica

Esta clasificación corresponde a la disminución del flujo de agua en cauces y cuerpos de agua superficiales. Así, es común medirla con ayuda del Índice Estandarizado de Esguerrimiento (SRI, Shukla y Wood, 2008).

Análisis multivariado

La clasificación anterior es de gran utilidad para estudiar los impactos de la sequía en distintas fases del ciclo hidrológico y en los distintos sectores socioeconómicos de un sistema. Sin embargo, cada uno de estos tipos es el reflejo de un mismo evento observado desde distintas etapas de su proceso de propagación. En este sentido, el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI; Hao y AghaKouchak, 2013, 2014) puede ser usado para caracterizar una sequía en su paso por todo el sistema hidrológico superficial, al evaluar simultáneamente las

condiciones de precipitación, humedad del suelo y el flujo en cauces y cuerpos de agua.

4.2.2. Escala temporal de análisis

La metodología para la determinación de los índices estandarizados de sequía permite el uso de integraciones temporales de las distintas variables. A pesar de que la ventana de integración es determinada arbitrariamente, las escalas temporales más comúnmente usadas son 1, 3, 6 y 12 meses. La Organización Mundial Meteorológica (2012) propuso una interpretación de las distintas escalas temporales del SPI en términos de los efectos de la sequía en distintas etapas del ciclo hidrológico (por ejemplo, 3 meses, para la sequía agrícola; 6 meses, para la sequía hidrológica, etc.). Si bien esta aproximación es ampliamente usada y ha demostrado ofrecer buenos resultados en algunos casos, puede perder validez en distintas regiones e, incluso, en distintas estaciones del año (Kumar *et al.*, 2016; Shukla y Wood, 2008).

Ante este escenario, este Plan contempla el cálculo de los índices estandarizados de sequía con una escala temporal (ventana de agregación) de 1 mes para evitar acumular valores que pueden no tener influencia en las condiciones actuales del proceso hidrológico y provocar un efecto de retraso en el inicio o terminación de un periodo seco (o húmedo).

4.3. Caracterización de la sequía

La ‘teoría de secuencias’ (conocida también como ‘teoría de cruces’), aplicada por primera vez para el análisis de sequías por Yevjevich (1967), es ampliamente usada en la actualidad para el análisis de las sequías. Este enfoque define los rasgos de la sequía a través del análisis de la serie temporal de una variable de interés. Consiste en la selección de un valor de referencia x_o que corta la serie temporal en muchas posiciones. La relación de x_o con los valores de la serie temporal x_i ($i = 1, 2, \dots, n$; donde n es el tamaño del registro) es interpretado como la intensidad del déficit de agua y sirve como base para identificar objetivamente el inicio y terminación de una sequía y cuantificar su duración (distancia entre dos cruces consecutivos entre los que existan solo desviaciones negativas) y magnitud (la suma de las desviaciones negativas entre dos cruces consecutivos). La Figura 1-4 identifica estos rasgos en una serie temporal.

En este Plan, la variable de interés ha sido definida como los índices estandarizados de sequía y el valor de referencia es 0, que refleja unas condiciones de sequía consideradas como “normales”.

De esta manera, todo evento de sequía puede ser caracterizado según el valor de sus rasgos tales como su intensidad máxima, intensidad media, magnitud y duración.

4.4. Etapas de severidad de sequía

La categorización de valores umbrales de severidad de sequía simplifica la comunicación de las condiciones de déficit a los tomadores de decisiones y al público en general. Adicionalmente, esta clasificación permite integrar medidas y acciones durante los eventos de sequía, progresivamente según su severidad aumenta.

Una clasificación muy sencilla, empleada por diversos sistemas de alerta, divide las etapas de atención a las sequías como sigue (GWP-CEE, 2015; Orden Ministerial, 2007; Sepulcre-Canto *et al.*, 2012):

Estado normal

En esta etapa tiene lugar la planeación hidrológica y la aplicación de medidas estratégicas y de largo plazo. Estas medidas se relacionan con la gestión de la demanda de agua (es decir, con su uso eficiente), infraestructura hidráulica para mejorar el almacenamiento y capacidad de regulación de la cuenca, infraestructura que promueva el uso de fuentes no convencionales de agua (por ejemplo, instalaciones que reutilizan aguas tratadas), y otras medidas con visión de largo plazo.

Estado de prealerta

En esta etapa, el objetivo es prevenir el deterioro de cuerpos de agua, a la vez que se activan algunas medidas de gestión, principalmente informativas y de control, así como medidas de ahorro voluntario de agua.

Estado de alerta

Éste representa una intensificación del estado de prealerta, en la que la sequía, y las medidas para atenderla, incrementan. La prioridad es prevenir el deterioro de las condiciones de los cuerpos de agua y las medidas se enfocan en ahorrar el recurso. Pueden ocurrir algunas

4.4. ETAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA

Tabla 4-1. Niveles de alerta en función de la severidad de sequía.

Nivel de sequía	Rango de frecuencia (años)	Descripción
Estado normal	$T < 5$	Sin desviaciones significativas con respecto a los valores considerados como "normales".
Estado de prealerta	$5 \leq T < 10$	El monitoreo muestra la etapa inicial del desarrollo de una sequía.
Estado de alerta	$10 \leq T < 50$	El monitoreo evidencia la ocurrencia de una sequía y probablemente tendrá impactos en el futuro si no son adoptadas medidas de inmediato.
Estado de emergencia	$T \geq 50$	Los indicadores de sequía muestran que han ocurrido impactos y es imposible garantizar el abastecimiento de agua.

restricciones en la demanda, dependiendo de la priorización de los grupos más vulnerables afectados por la sequía. Deben ser monitoreadas con mayor intensidad aquellas áreas de alto valor ecológico.

Estado de emergencia (o extremo)

Si una vez aplicadas todas las medidas preventivas anteriores, la situación de sequía se vuelve crítica y las fuentes de agua son insuficientes para satisfacer las demandas esenciales, entonces pueden ser usadas medidas adicionales para minimizar los impactos en cuerpos de agua y ecosistemas.

Este Plan propone emplear como umbrales de severidad de sequía los periodos de retorno de 5, 10, y 50 años, ampliamente usados como umbrales de diseño en los estudios de eventos hidrometeorológicos extremos en México (ver la Tabla 2-2). Cada umbral determina el inicio de una etapa de gestión, como se resume en la Tabla 4-1.

4.1. Evaluación del riesgo de sequía

4.1.1. Amenaza

La información de las variables ambientales (precipitación, humedad del suelo y escurrimiento) para la estimación de los distintos índices de sequía, podrá ser derivada de la red de estaciones de la Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN) y del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), de los conjuntos de datos del producto de análisis atmosférico retrospectivo de la NASA *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*, versión 2 (MERRA-2) o de otras fuentes de información a las que se tenga acceso durante el análisis. La elección de la fuente de información dependerá, además de su disponibilidad, de aspectos como su precisión y periodicidad de registros.

La elección del índice de sequía usado para caracterizar las condiciones de déficit depende de los objetivos del análisis de riesgo de sequía de que se trata. Por ejemplo, el riesgo de sequía en el subsistema (sector) agrícola, se verá mejor representado a partir del análisis de la amenaza de sequía agrícola, con apoyo del SSI. Por otro lado, desde un punto de vista general, el riesgo puede ser evaluado a través de un enfoque multivariado, usando el MSDI.

La caracterización de los eventos de sequía ocurridos durante el periodo del que se tenga registro se lleva a cabo mediante el análisis de las series temporales de los índices de sequía. La amenaza que representa un evento de sequía puede ser evaluada en términos de la frecuencia con que su severidad es excedida. Para esto, se realiza un análisis de frecuencia a las series de duración parcial de eventos independientes de sus principales rasgos, como fue descrito en la Subsección 1.2.

Diversos autores han empleado la combinación de la duración y otro rasgo como la intensidad y la magnitud de sequía para caracterizar los eventos y estimar su frecuencia (por ejemplo, Andreadis *et al.*, 2005; Halwatura *et al.*, 2015). Aquí, se propone el uso conjunto de la duración y magnitud.

4.1.2. Vulnerabilidad

En secciones anteriores fueron establecidas las ventajas de evaluar la vulnerabilidad de un sistema ante la ocurrencia de sequías en términos

cuantificables en unidades monetarias, es decir, como pérdidas económicas potenciales.

La Subsección 1.3 presenta una detallada revisión de las metodologías reportadas en la literatura para la cuantificación de las pérdidas derivadas de los efectos de una sequía. No obstante, una selección de los métodos más recomendados para evaluar los costos directos tangibles de la sequía incluye a las técnicas de valuación de mercado, dado que éstas pueden ser aplicadas a cualquier sector económico, son relativamente fáciles de aplicar y sus estimaciones tienden a ser más precisas (Logar y van den Bergh, 2011).

Existe un consenso en la literatura e informes sobre el tema al respecto de que la disponibilidad o carencia de información suficiente y precisa es la principal limitación para la estimación de las pérdidas derivadas de la sequía. Por lo tanto, la elección de la metodología para este análisis deberá adaptarse a la disponibilidad de datos en la zona de estudio y sobre el sector evaluado.

4.1.3. Riesgo

Una vez que se cuenta con una cuantificación de la vulnerabilidad ante sequías en el sistema de interés, el riesgo de sequía es estimado para los umbrales de severidad que se definen en la Subsección 4.4 o para los eventos de interés. El cálculo del riesgo se basa en el modelo de ‘presión y alivio’ (PAR; Wisner *et al.*, 2003), como el producto de la amenaza y la vulnerabilidad (Ecuación 2.1).

4.2. Medidas de gestión

Cada nivel de severidad dentro del sistema de alerta (ver la Tabla 4-1) debe tener asignado un programa de medidas. Las medidas de gestión del riesgo de sequía han sido clasificadas en la literatura en función de una gran variedad de criterios. Una de ellas es en función de su propósito, como sigue: (i) medidas preventivas (o estratégicas), (ii) medidas operativas (o tácticas), (iii) medidas organizativas, (iv) medidas de seguimiento, y (v) medidas de restauración (European Commission, 2007; GWP-CEE, 2015). A continuación, se describe cada una de estas categorías.

4. DESARROLLO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS

4.2.1. Medidas preventivas (o estratégicas)

Éstas son desarrolladas y aplicadas durante el estado de normalidad. Tienen el propósito de incrementar la resistencia del sistema ante el embate de sequías y fortalecer su capacidad de respuesta para mitigar riesgos e impactos potenciales en la economía, sociedad, y ambiente.

La Tabla 4-2 presenta una lista de ejemplos de medidas preventivas estructurales y no estructurales.

Tabla 4-2. Medidas generales de carácter preventivo (medidas estratégicas) para la gestión del riesgo de sequía (European Commission, 2007).

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Normal	No estructural	Desarrollar las medidas de gestión básicas de los Planes de Gestión de Sequía por Cuenca.
Normal	No estructural	Desarrollar las medidas de gestión complementarias de los Planes de Gestión de Sequía por Cuenca.
Normal	No estructural	Desarrollar un marco de trabajo operacional para Centros de Intercambio de Derechos (reasignación de concesiones).
Normal	No estructural	Realizar estudios para mejorar el conocimiento de los cuerpos de agua.
Normal	No estructural	Realizar estudios para mejorar el conocimiento del sistema hidrológico en los humedales.
Normal	No estructural	Establecimiento de protocolos de operación óptima de la infraestructura hidráulica (presas, acueductos, sistemas de abastecimiento, etc.) para maximizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.
Normal y prealerta	Estructural	Realizar un inventario y dar mantenimiento a la infraestructura que esté involucrada en la mitigación de los impactos de las sequías (presas, acueductos, etc.).

4.2.2. Medidas operativas (o tácticas)

Son aquellas medidas aplicadas típicamente durante un evento de sequía (en estado de prealerta, alerta y emergencia). Consisten, principalmente, en medidas de control, difusión de la información, y conservación de los recursos hídricos. La aplicación de medidas, tales como la restricción del uso de agua, debe ser categorizada en función de la prioridad entre los distintos tipos de uso, requerimientos ambientales, severidad de la sequía, etc. Cada nivel dentro del sistema de alerta debe contar con una cartera de medidas acordes a sus objetivos.

4.2. MEDIDAS DE GESTIÓN

Durante la prealerta el objetivo de las medidas es la preparación para la posibilidad de impactos derivados de la sequía. Las acciones tienen una calidad de recomendación, con una implementación basada en acciones voluntarias.

Durante el estado de alerta el objetivo de las medidas es superar la sequía y evitar una situación de emergencia. La prioridad radica en mitigar los impactos derivados de la sequía observados en grupos específicos y prevenir el deterioro del estado de los cuerpos de agua. El enfoque debe ser el ahorro de agua.

Durante el estado de emergencia el objetivo es mitigar los impactos y minimizar los daños. La prioridad de las medidas se concentra en satisfacer los requerimientos mínimos para el uso doméstico y público urbano de agua potable y los otros usos quedan relegados a segunda prioridad.

La Tabla 4-3 presenta una lista de ejemplos de medidas operativas estructurales y no estructurales.

Tabla 4-3. Medidas generales de carácter operativo (medidas tácticas) para la gestión del riesgo de sequía (European Commission, 2007).

Etapas de alerta	Tipo	Descripción
Prealerta	No estructural	Campañas de ahorro voluntario en el abastecimiento público urbano, información y concientización social.
Prealerta	Estructural	Verificar el adecuado funcionamiento de la infraestructura de abastecimiento doméstico y público urbano.
Prealerta	Estructural	Finalizar la construcción de la infraestructura planeada para hacer frente a las sequías (pozos de bombeo, plantas desalinizadoras de agua, sistemas de reúso) solo si han sido consideradas otras opciones y han sido aplicadas medidas preventivas.
Alerta	No estructural	Campañas de ahorro voluntario en los usos distintos al doméstico y público urbano; en particular, en el uso agrícola.
Alerta y Emergencia	No estructural	Reducción del volumen de agua en los usos distintos al doméstico y público urbano; en particular, en el uso agrícola.
Alerta y Emergencia	No estructural	Incrementar la extracción de aguas subterráneas (solo si se cuenta con información suficiente para pronosticar una recuperación futura).
Alerta y Emergencia	No estructural	Activar e incrementar el reúso de aguas residuales.
Alerta y Emergencia	No estructural	Activar e incrementar el uso de plantas desalinizadoras (ya construidas y en uso).

4. DESARROLLO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS

Tabla 4-3. Medidas generales de carácter operativo (medidas tácticas) para la gestión del riesgo de sequía (European Comission, 2007).

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Alerta y Emergencia	No estructural	Transferencia de recursos hídricos dentro de la cuenca.
Alerta y Emergencia	No estructural	Mantener, como criterio general, los requerimientos hidrológicos ambientales definidos para cada cuenca.
Alerta y Emergencia	No estructural	Evitar el uso de volúmenes mínimos en presas que presenten o estén en riesgo de presentar eutroficación.
Alerta y Emergencia	No estructural	Incrementar el control de descargas, plantas de tratamiento de aguas residuales, prácticas agrícolas y calidad del agua.
Emergencia	No estructural	Prohibición de usos (regar jardines, llenado de piscinas, limpieza de vialidades, cultivos con alta demanda de agua, campos de golf, etc.).
Emergencia	No estructural	Activar Centros de Intercambio de Derechos (reasignación de concesiones) para asegurar el abastecimiento para usos doméstico y público urbano y evitar daños en cuerpos de agua.
Emergencia	No estructural	Imponer restricciones a los requerimientos hidrológicos ambientales definidos para cada cuenca en caso de que sea necesario asegurar el abastecimiento doméstico y público urbano. Esta medida es válida siempre y cuando dichas restricciones no representen un daño a los ecosistemas, hábitats, y especies vulnerables ante las sequías.
Emergencia	No estructural	Reforzar la vigilancia del uso del agua, los procedimientos para sancionar el uso inadecuado y el monitoreo selectivo de elementos clave.
Emergencia	No estructural	Capturar y relocalizar fauna en peligro y crear áreas especiales para mantener especies acuáticas.
Todas las etapas	No estructural	Evitar la extracción directa de humedales vulnerables ante situaciones de sequía.

4.2.3. Medidas organizativas

Este tipo de medidas está presente en todos los niveles del sistema de alerta. Son aquellas orientadas a asegurar la producción e implementación del Plan de Gestión del Riesgo de Sequía mediante una organización adecuada. La Tabla 4-4 presenta una lista de ejemplos de medidas organizativas no estructurales para la gestión del riesgo de sequía.

4.2. MEDIDAS DE GESTIÓN

Tabla 4-4. Medidas generales de carácter organizativo (sistema de gestión) para la gestión del riesgo de sequía.

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Prealerta	No estructural	Activar, solo en casos necesarios, una Oficina Técnica de Sequía o una estructura similar
Prealerta y Alerta	No estructural	Activar planes o medidas especiales para el abastecimiento para uso doméstico y público urbano.
Alerta y Emergencia	No estructural	Preparar y aprobar acuerdos y resoluciones administrativas orientadas a la mitigación de los impactos de la sequía.
Emergencia	No estructural	Aprobar, solo en casos necesarios, decretos y leyes referentes a la sequía.
Emergencia	No estructural	Establecer una Comisión de Gestión de la Sequía.
Recuperación	No estructural	Aprobar medidas de recuperación.
Recuperación	No estructural	Desactivar las estructuras organizativas especiales establecidas (como la Oficina Técnica de Sequía).
Todas las etapas	No estructural	Dar seguimiento (monitorear) a los indicadores de sequía.
Todas las etapas	No estructural	Establecer canales para la coordinación entre las entidades administrativas, públicas y privadas, vinculadas con el Plan de Gestión de Sequías.
Todas las etapas	No estructural	Establecer actividades de participación pública para informar y promover la colaboración con el objetivo de asegurar la efectividad de las medidas del Plan de Gestión de Sequías.

4.2.4. Medidas de seguimiento

Son aquellas aplicadas para vigilar y evaluar de la ejecución del Plan de Gestión del Riesgo de Sequía y sus resultados. La Tabla 4-5 presenta una lista de ejemplos de medidas de seguimiento no estructurales para la gestión del riesgo de sequía.

Tabla 4-5. Medidas generales para el seguimiento del Plan de Gestión de Sequía.

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Todas las etapas	No estructural	Dar seguimiento a los indicadores de las etapas de la sequía.
Prealerta, Alerta, Emergencia y Recuperación	No estructural	Revisar —y modificar, si resulta necesario— los indicadores de seguimiento del Plan de Gestión de Sequías

4. DESARROLLO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO ANTE SEQUÍAS

Tabla 4-5. Medidas generales para el seguimiento del Plan de Gestión de Sequía.

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Recuperación	No estructural	Revisar los logros de las medidas de gestión adoptadas mediante auditorías postsequía.
Recuperación	No estructural	Revisar —y modificar, si resulta necesario— el Plan de Gestión de Sequía.

4.2.5. Medidas de restauración (o soluciones de salida de la sequía)

Este conjunto de medidas se implementa al terminar un evento de sequía con el objetivo de recuperar las condiciones normales del sistema. La Tabla 4-6 presenta una lista de ejemplos de medidas de restauración no estructurales para la gestión del riesgo de sequía.

Tabla 4-6. Medidas generales para la restauración posterior al final de una sequía.

Etapa de alerta	Tipo	Descripción
Recuperación	No estructural	Desactivar las medidas de abastecimiento adoptadas en las etapas anteriores.
Recuperación	No estructural	Eliminar las restricciones de abastecimiento.
Recuperación	No estructural	Eliminar las restricciones de uso del agua.
Recuperación	No estructural	Activar las medidas de correctivas necesarias para restaurar los ecosistemas, hábitats y especies afectados.

5. Aplicación de los métodos de evaluación de riesgo y el Plan de Gestión de Riesgo en la cuenca del río Bravo para determinación del riesgo de sequía

5.1. Introducción

En esta Sección se aplican las metodologías propuestas en este estudio a la cuenca del río Bravo, que representa la región hidrológica Bravo-Conchos. Fue cuantificado el riesgo de sequía en la región y aplicado para el escenario de sequía ocurrido durante 1994-2008. Aquí se documentan los métodos, variables y particularidades del análisis y se incluyen algunas recomendaciones sobre las acciones que disminuyan los daños estimados en las zonas de riesgo en un Plan de Gestión de Riesgo al Reglamento del río Bravo y evaluar la capacidad de disminución del riesgo en el sistema.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

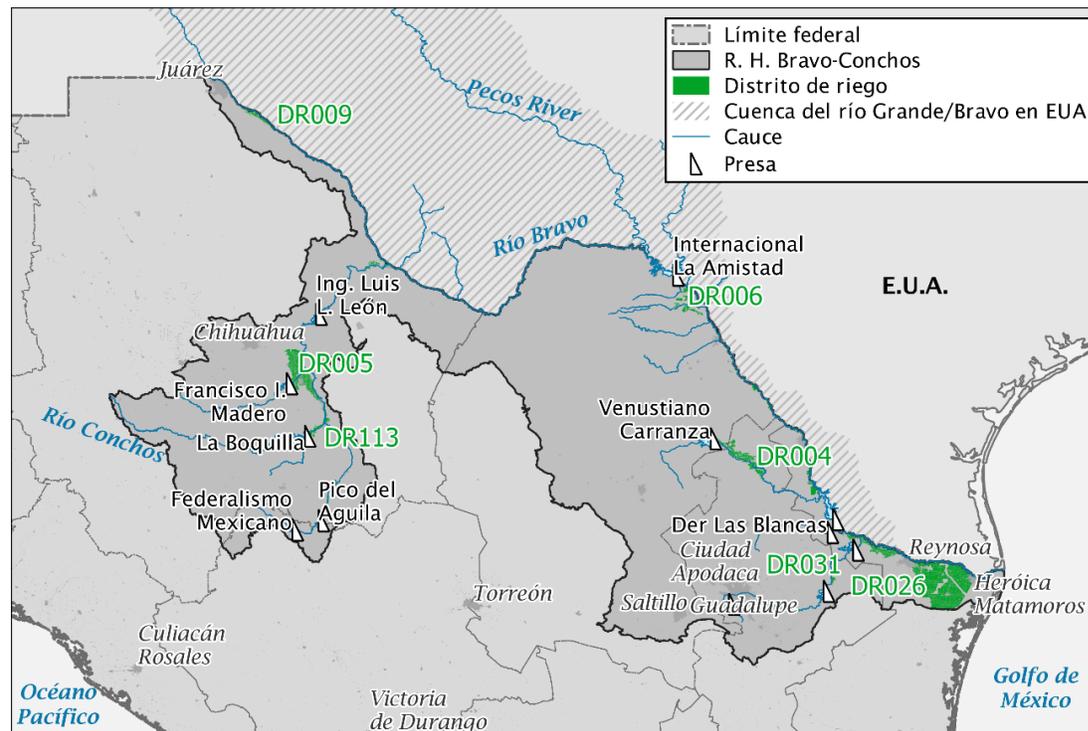


Figura 5-1. Región hidrológica Bravo-Conchos.

5.2. Antecedentes

5.2.1. Zona de estudio

La región hidrológica número 24, Bravo-Conchos, se localiza al norte del país, dentro de los límites políticos de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas (ver la Figura 5-1). Representa la porción mexicana de la cuenca del río Bravo, cuyo cauce principal sirve como frontera natural entre México y EUA en una longitud de 2 017 km, desde las ciudades de El Paso, Texas, y Ciudad Juárez, Chih., hasta su desembocadura en el Golfo de México.

El río nace en la cordillera de las Rocallosas, en Colorado (EUA), y fluye dentro de territorio estadounidense hacia el sur hasta alcanzar la frontera con México en Ciudad Juárez. En su paso hacia su desembocadura en el Golfo de México, encuentra importantes ciudades fronterizas, como Ojinaga, en Chihuahua; Ciudad Acuña y Piedras Negras, en Coahuila; y Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros, en Tamaulipas.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

La región Bravo-Conchos cuenta con 56 presas grandes (con alturas de cortinas entre 15 y 150 m), de las que las de mayor capacidad de almacenamiento son La Boquilla (2 903 hm³), Venustiano Carranza (1 322 hm³) y El Cuchillo-Solidaridad (1 123 hm³), además de Internacional La Amistad (1 703 hm³) e Internacional Falcón (1 355 hm³), cuyos vasos se encuentra en la línea fronteriza con el país vecino. En total, 665 almacenamientos de diversas dimensiones abastecen a los usuarios de la región, en la que habitan más de nueve millones de personas y se riegan 458 mil hectáreas de suelo agrícola, distribuidos en diez distritos de riego, de los que el Bajo Río Bravo (D. R. 025, en Tamaulipas) es el más grande (202 548 ha).

La asignación del agua de esta cuenca es regida entre los países por el Tratado sobre Aguas Internacionales, firmado en febrero de 1944. Según este documento, la porción de recursos hídricos derivados de esta cuenca hidrográfica que corresponde a México está definida de la siguiente manera (CONAGUA, 2011):

- dos terceras partes de los escurrimientos de los seis afluentes mexicanos (ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y arroyo Las Vacas);
- la mitad del escurrimiento de la cuenca del río Bravo aguas abajo de la presa Internacional Falcón;
- la mitad del escurrimiento de la cuenca del río Bravo no asignado y no aforado, entre Fort Quitman y la presa Internacional Falcón; y
- el total de los escurrimientos de los ríos Álamo y San Juan.

Por otro lado, a EUA corresponden los siguientes volúmenes:

- una tercera parte del escurrimiento de los seis afluentes mexicanos (listados arriba), no menor, en suma, que 431.7 hm³ anuales, en promedio y en ciclos de cinco años consecutivos;
- la mitad del escurrimiento de la cuenca del río Bravo aguas abajo de la presa Internacional Falcón;
- la mitad del escurrimiento de la cuenca del río Bravo no asignado y no aforado, entre Fort Quitman y la presa Internacional Falcón; y

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

- el total del escurrimiento de los ríos Pecos, Devils, Manantial Goodenough, Alamito, Terlingua, San Felipe y Pinto.

De relevancia para el presente estudio es la consideración que el Tratado hace referente a la ocurrencia de sequías. Establece que en caso de un evento extraordinario (o ante un accidente grave en los sistemas hidráulicos de los afluentes mexicanos) que impida dejar escurrir el volumen anual acordado para EUA, México podrá reponer el volumen faltante en el quinquenio siguiente, con agua de los mismos tributarios.

En un análisis de los recursos hídricos en la región, publicado en 2011, la CONAGUA identificó cinco situaciones que comprometen la disponibilidad de agua para los distintos usuarios de la región; a saber: (i) falta de agua, (ii) eficiencia limitada en su uso, (iii) contaminación de cuerpos de agua, (iv) sobreexplotación de acuíferos, y (v) competencia por el uso del agua entre los distintos sectores de la sociedad.

5.3. Metodología

5.3.1. Función de daño

En este análisis fueron cuantificados los daños derivados de la ocurrencia de una sequía a partir de la construcción de funciones de daño (ver la Sección 1.3). Para la aplicación de esta técnica, fue empleado el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI) con escala temporal de un mes y calculado para las variables de precipitación, escurrimiento y humedad del suelo.

Por otro lado, fue evaluada la vulnerabilidad de dos variables con información disponible: el rendimiento de producción agrícola (en ton/ha cultivada), y el déficit de asignación de agua (en hm^3) a los distintos usuarios de la región Bravo-Conchos.

Finalmente, dado que los registros existentes acerca de las variables señaladas son relativamente cortos, la relación funcional entre la severidad de las sequías y los daños se limitó a funciones lineales.

5.3.2. El daño anual esperado (DAE)

El riesgo que representa la ocurrencia de sequías fue evaluado siguiendo la metodología del daño anual esperado (DAE; Baró-Suárez, Díaz-Delgado, *et al.*, 2011), usado ampliamente en la cuantificación de riesgos de

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

inundación. Este método representa una aplicación simple del modelo PAR, descrito en la Sección 1.1 para estimar el riesgo en términos cuantitativos.

Una vez obtenido el cálculo de los daños económicos para cada período de retorno de interés, el DAE es evaluado mediante la fórmula siguiente (Meyer *et al.*, 2012):

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^n D_i x \Delta P(i) \quad (1)$$

donde D_i , es el daño medio de dos eventos de daño $D(P_{i-1})$ y $D(P_i)$, calculado como sigue:

$$D_i = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \quad (2)$$

ΔP_i es el intervalo de probabilidades de excedencia de ambos eventos, calculado como sigue:

$$\Delta P_i = |P_i - P_{i-1}| \quad (3)$$

El cálculo del DAE tiene su base en la valoración económica del daño promedio de dos eventos de probabilidad de excedencia i , con un intervalo de probabilidad (ΔP_i) entre las probabilidades de excedencia de ambos eventos.

5.3.3. Optimización de la distribución del agua

Las características climatológicas de la región hidrológica Bravo-Conchos, la configuración de su red de drenaje natural e infraestructura hidráulica, la distribución de su población y actividades económicas y los compromisos internacionales relativos al agua, ponen el escenario al complejo sistema de manejo de los recursos hídricos de la cuenca. La competencia que los diversos sectores sociales mantienen por el aprovechamiento del agua disponible en la región representa la dimensión social en el desafío de su gestión. En este contexto, la distribución equitativa del recurso representa un verdadero desafío para la CONAGUA, situación que se ve exacerbada durante periodos de sequía.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Ante estas condiciones, durante este estudio fue evaluada la eficacia que tiene la optimización de la distribución del agua en la región hidrológica Bravo-Conchos como medida de gestión del riesgo de sequía, a través de la combinación de un modelo numérico de gestión de la cuenca y la implementación de un esquema de optimización numérica acoplado a éste.

El modelo de la cuenca del Río Bravo tiene sus orígenes en el año 2000, cuando se acordó elaborar un Proyecto de Reglamentación para la Distribución del recurso hídrico superficial (CONAGUA-CILA-UACH, 2013-2016), cuyo resultado ha sido el modelo con el software Riverware®. Actualmente, el sistema comprende la cuenca del Río Bravo, bajo la conceptualización del informe “Refinamiento y calibración del modelo matemático para el análisis de distribución de las aguas superficiales de la cuenca del río Bravo y generación de políticas de operación” (Convenio de Colaboración CILA-UACH-2015).

Para el presente documento, dicho modelo se definió como caso de prueba bajo el objetivo principal de diseñar una regla de operación que ayude a cumplir con los compromisos en las asignaciones y las entregas a EU ante fenómenos de sequía. Bajo esta condición se definió realizar una optimización del modelo como herramienta en el diseño a la regla planteada. Dicha optimización se planteó con dos funciones objetivo 1) maximizar el cumplimiento a las concesiones de todos los usos y 2) cumplir con el tratado internacional con EU.

Las variables que determinan la estructura y el estado del sistema incluyen: el volumen de agua almacenado en la presa, el volumen de agua que desfoga la presa y el porcentaje abastecido de la concesión, en cada periodo. La relación entre las variables independientes y el flujo de entrada se da mediante la ecuación de continuidad a nivel vaso de almacenamiento. La variable de decisión para este problema es la cantidad de agua desfogada por la presa.

Por lo tanto, bajo este esquema la función objetivo es la siguiente:

$$\max \sum (\text{Asignaciones} - \text{Concesiones})$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Con la cual se busca que la diferencia entre el volumen asignado al cumplimiento de una demanda y la concesión que por ley le corresponde sea nula o lo más pequeña posible.

Por lo que para un sistema de presas la función objetivo se expresa de la siguiente manera:

$$\max \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T a_i(t) - con_i(t)$$

donde $con_i(t)$ es igual al volumen de la demanda total bruta de la presa i , $a_i(t) = con_i(t) \cdot \alpha_i(t)$, y $0 \leq \alpha_i(t) \leq 1$, siendo α_i la proporción de la demanda total bruta a satisfacer.

Dentro de la cuenca del Río Bravo, existen las siguientes 16 presas:

1. La Amistad
2. Boquilla
3. Centenario
4. Chihuahua
5. El Cuchillo
6. Falcón
7. La Boca
8. La Fragua
9. Las Blancas
10. Luis L. León
11. Francisco I. Madero
12. Marte R. Gómez
13. Pico de Águila
14. San Gabriel
15. San Miguel
16. V. Carranza

Siendo de interés para este estudio, las presas de La Amistad, Boquilla, Falcón, Luis L. León, Francisco I. Madero, Marte R. Gómez, Pico de Águila, San Gabriel, y V. Carranza.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

La presa Chihuahua abastece únicamente al uso público urbano; la presa La Fragua sirve para el control de avenidas y la presa Las Blancas es una derivadora. Por lo tanto, estas no forman parte del análisis para el presente estudio. Las presas La Boca, el Cuchillo y Marte R. Gómez forman un sistema en serie, aunque entre la presa el Cuchillo y Marte R. Gómez existen reglas propias de operación, por lo tanto, al optimizar la presa Marte R. Gómez se afecta el desempeño del sistema de presas. Bajo las consideraciones anteriores, el sistema se compone de nueve presas, con sus respectivas concesiones (Figura 5-2).

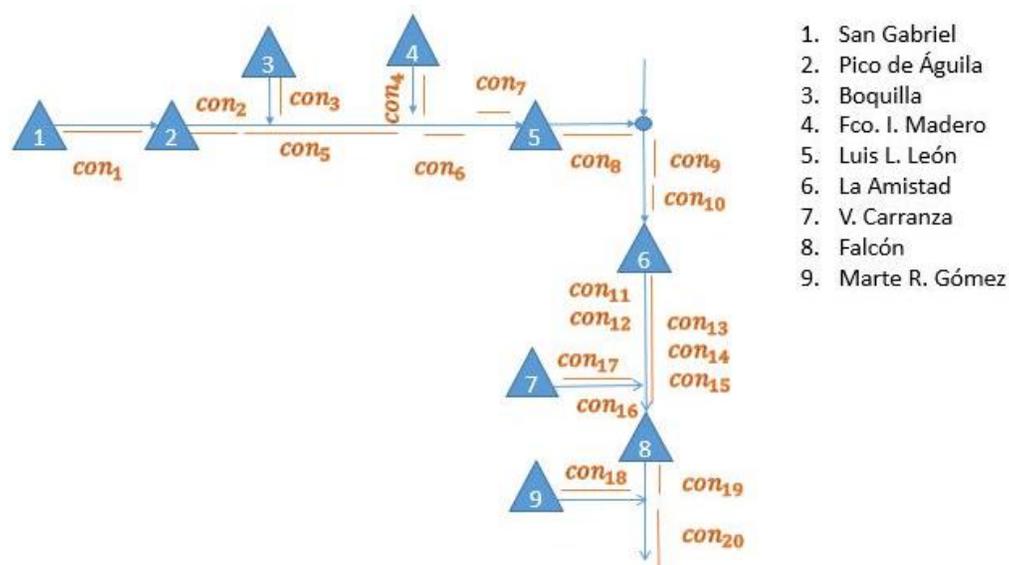


Figura 5-2. Esquema de demandas concesionadas para las presas de la cuenca del Río Bravo.

En la Tabla 5.1 se describe cada una de las agrupaciones de las concesiones que se realizaron y el parámetro utilizado para su cálculo mensual.

Tabla 5-1. Definición de concesiones y agrupación de objetos del modelo de la cuenca del Río Bravo de Riverware.

CONCESIÓN	OBJETOS	PARÁMETROS
CON ₁	DR103-1	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ab DR PC SC4	P ₅₀ Agrícola
		P ₅₀ Domestico
		P ₅₀ Otros
CON ₂	DR103-2	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONCESIÓN	OBJETOS	PARÁMETROS
	DR103-3	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ar DR PC SC5 Agrícola, Extr Ab DR PC SC5.a	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ab DR PC SC5.o	P ₅₀ Otros
CON ₃	DR 05	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ab DR PC SC6y10.d	P ₅₀ Domestico
	Extr Ab DR PC SC6y10:Otros, Extr Ab DR PC SC6y10.o	P ₅₀ Otros
CON ₄	DR 05 San Pedro	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	P ₅₀ Agrícola
CON ₅	Extr FC SC6y10 Rio Florido Agrícola	P ₅₀ Agrícola
CON ₆	Extr Ab DR PC SC6y10 Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	Exp SC6y10 Imp SC12	P ₅₀ Otros
CON ₇	Extr Ab DR PC SC12.a	Con7.a
	Extr Ab DR PC SC12.o	Con7.o
CON ₈	DR 090	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ar DR PC SC13.a	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ar DR PC SC13.d	P ₅₀ Domestico
	Extr Ar DR PC SC13.O	P ₅₀ Otros
CON ₉	Extr PC SC14 I Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	Extr PC SC14 I.d	P ₅₀ Domestico
	Extr PC SC14 I.o, Extr PC SC14 II Otro	P ₅₀ Otros
CON ₁₀	Extr PC SC15.a	P ₅₀ Agrícola
	Extr PC SC15.o	P ₅₀ Otros
CON ₁₁	Extr Cd Acuna	P ₅₀ PU
CON ₁₂	DR 06 M3	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ab DR PC SC20 Mex	P ₅₀ Domestico
CON ₁₃	DR 050 SC 22	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr PC SC22 Agrícola	P50 Agrícola
	Extr Piedras Negras	P ₅₀ PU
	Extr PC SC22 Domestico	P ₅₀ Domestico
CON ₁₄	DR 050 SC 24	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr PC SC24 Agrícola	P ₅₀ Agrícola

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONCESIÓN	OBJETOS	PARÁMETROS
	Extr CFE SC24	P ₅₀ Otros
	Extr PC SC22 Domestico	P ₅₀ Domestico
CON₁₅	DR 050 SC 25	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ar DR PC SC25 Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	Extr SC25 Mex: Nuevo Laredo	P ₅₀ PU
	Extr Ar DR PC SC25 Domestico; Extr SC25 Mex: Ab DR PC SC25 Domestico	P ₅₀ Domestico
CON₁₆	DR 050 SC 29	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Nueva Cd. Guerrero	P ₅₀ PU
CON₁₇	DR 004 Don Martín	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	Extr Ab DR PC SC28 I:Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	Extr Ab DR PC SC28 I:Otros	P ₅₀ Otros
CON₁₈	DR 026	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
CON₁₉	DR 025	Límite Superior (Título de concesión, REPGA)
	DR 026 SC36	P ₅₀ Agrícola
	Ciudad Mier, M Alemán, Díaz Ordaz, Reynosa	P ₅₀ PU
	Extr Ab DR PC SC36:Domestico	P ₅₀ Domestico
	Extr Ab DR PC SC36:Otros,Extr Ab DR PC SC36:Perdida por creciente	P ₅₀ Otros
CON₂₀	Ciudad Bravo	P ₅₀ PU
	ExtrSC37:Agrícola	P ₅₀ Agrícola
	ExtrSC37:Otros,ExtrSC37:C Retamal	P ₅₀ Otros

La función objetivo para este sistema es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 &max[(a_1(t) - con_1(t)) + (a_2(t) - con_2(t)) + (a_3(t) - con_3(t)) \\
 &\quad + (a_4(t) - con_4(t)) + (a_5(t) - con_5(t)) + (a_6(t) - con_6(t)) \\
 &\quad + (a_7(t) - con_7(t)) + (a_8(t) - con_8(t)) + (a_9(t) - con_9(t)) \\
 &\quad + (a_{10}(t) - con_{10}(t)) + (a_{11}(t) - con_{11}(t)) + (a_{12}(t) - con_{12}(t)) \\
 &\quad + (a_{13}(t) - con_{13}(t)) + (a_{14}(t) - con_{14}(t)) + (a_{15}(t) - con_{15}(t)) \\
 &\quad + (a_{16}(t) - con_{16}(t)) + (a_{17}(t) - con_{17}(t)) + (a_{18}(t) - con_{18}(t)) \\
 &\quad + (a_{19}(t) - con_{19}(t)) + (a_{20}(t) - con_{20}(t))]
 \end{aligned}$$

Sujeta a las siguientes restricciones que se listan a continuación.

1. Restricciones de igualdad: ecuación de continuidad

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

a) Presas cabeceras, $i = 1, 3, 4, 7$ y 9

$$x_{al_i}(t) = x_{al_i}(t - 1) + x_{In_i} - x_{e_i} - x_{re_i}$$

donde x_{al_i} es el volumen de agua almacenado en la presa i , $x_{al_i}(t - 1)$ es el volumen de agua almacenado en la presa i en el periodo anterior, x_{In_i} es el volumen de agua entrante a la presa, x_{e_i} es el volumen evaporado de agua en el vaso de la presa y x_{re_i} es el volumen de agua desfogado por la presa.

$$\begin{aligned} x_{al_2}(t) &= x_{al_2}(t - 1) - x_{e_2} - x_{re_2} + x_{re_1} - x_{p_2} - a_1 \\ x_{al_5}(t) &= x_{al_5}(t - 1) - x_{e_5} - x_{re_5} + x_{re_2} + x_{re_3} + x_{re_4} - \sum a_{2-7} - x_{p_5} \\ &\quad + \sum In_{2-6} \\ x_{al_6}(t) &= x_{al_6}(t - 1) - x_{e_6} - x_{re_6} + x_{re_5} - \sum a_{8-10} + \sum In_{7-10} + T_1 \\ x_{al_8}(t) &= x_{al_8}(t - 1) - x_{e_8} - x_{re_8} + x_{re_6} + (x_{re_7} - a_{17}) - \sum a_{11-16} - x_{p_6} \\ &\quad + T_6 \end{aligned}$$

donde a_i es el volumen de agua asignado para el pago de la concesión, T_1 y T_6 son los pagos del tratado y x_{p_i} , $i = 2, 5, 6, 8$ representan las pérdidas de volúmenes de agua entre presas, estas se calculan de acuerdo con el esquema de la figura 5.5.

b) Cierre del sistema

$$x_{re_8} + x_{re_9} - a_{18} - a_{19} - a_{20} - x_{p_G} = \sum In_{21-23}$$

2. Restricciones de inequidad: además de la ecuación de continuidad se debe de considerar la siguiente restricción: el volumen asignado a satisfacer las concesiones no puede ser mayor que el volumen desfogado por la presa aguas arriba, esto establece la dirección del flujo.

$$x_{re_i} - a_i \geq 0; i = 1, \dots, 9$$

$$x_{re_2} + x_{re_3} + x_{re_4} - \sum a_{2-7} - x_{p_5} \geq 0$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

$$x_{re_5} - \sum a_{8-10} - x_{p_6} \geq 0$$

$$x_{re_8} + x_{re_9} - \sum a_{18-20} - x_{p_8} \geq 0$$

3. Restricciones de límites: son las restricciones físicas de las presas y los límites de asignación de la concesión.

$$x_{al_{min_i}} \leq x_{al_i}(t) \leq x_{al_{máx_i}}$$

$$a_{min_i} \leq a_i(t) \leq a_{máx_i}$$

Una variable por considerar dentro de la ecuación de continuidad son las pérdidas de agua entre las presas, estas pérdidas se calcularon de acuerdo con la Figura 5-34.

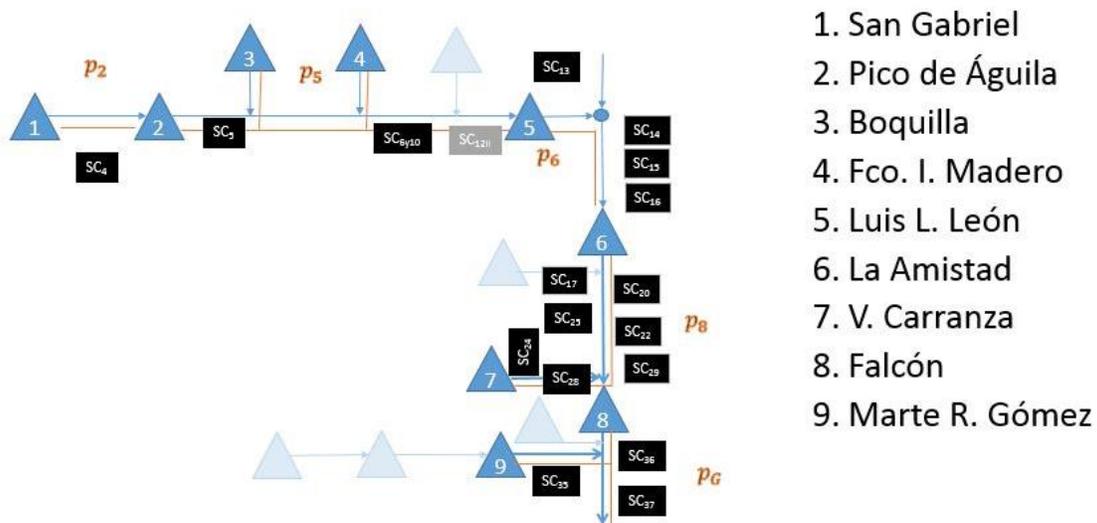


Figura 5-3. Esquema de pérdidas para las presas de la cuenca del Río Bravo.

Pago del Tratado de 1944

Para maximizar el cumplimiento de la entrega de agua a los Estados Unidos para los diferentes puntos de entrega se utiliza la función objetivo siguiente:

$$\max \sum_t^T x_r(t)$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

$$x_r(t) = x_{re}(t) - [x_p(t) + a(t)]$$

donde $x_r(t)$ es el volumen de agua el punto de entrega, $x_{re}(t)$ es el volumen de agua descargada para la presa aguas arriba o el volumen de agua que pasa por la estación hidrométrica correspondiente, según sea el caso si no existe una presa aguas arriba del punto de entrega, $x_p(t)$ son las pérdidas desde la presa hasta el punto de entrega y $a(t)$ es la asignación de agua a los distintos usuarios, y el paso del tiempo tendrá un $\Delta t = 1$ mes.

La entrega de agua a EUA se hace en seis puntos

1. Río Conchos
2. Arroyo las Vacas
3. Río San Diego
4. Río San Rodrigo
5. Río Escondido
6. Río Salado

Considerando estos puntos la función objetivo quedaría expresada

$$\max \sum_t^T \sum_{j=1}^6 x_{r_j}(t)$$

$$x_{r_j}(t) = x_{re_j}(t) - [x_{p_i}(t) + a_j(t)]; j = 1, \dots, 6$$

Sujeta a las mismas restricciones físicas de las presas y a las restricciones de las asignaciones que el primer objetivo.

$$x_{al_{mín_i}} \leq x_{al_i}(t) \leq x_{al_{máx_i}}$$

$$a_{mín_i} \leq a_i(t) \leq a_{máx_i}$$

También se tomará en cuenta las restricciones administrativas del tratado, valores máximos y mínimos de entrega.

$$\sum_{t=1}^5 x_{en}(t) \leq x_{pac}$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

$$\sum_{t=1}^5 (x_{pac} - x_{en}) \leq \rho \text{ [hm}^3\text{]}$$

$$x_{enT} = \sum_{j=1}^6 x_{enj}$$

donde x_{pac} es el volumen pactado en el tratado de aguas internacionales, x_{en} es el volumen real entregado y ρ es un volumen mínimo de entrega anual a cumplir.

La esquematización de los puntos de entrega del sistema, Figura 5.5 facilita el entendimiento de las ecuaciones planteadas en el diseño de la optimización.

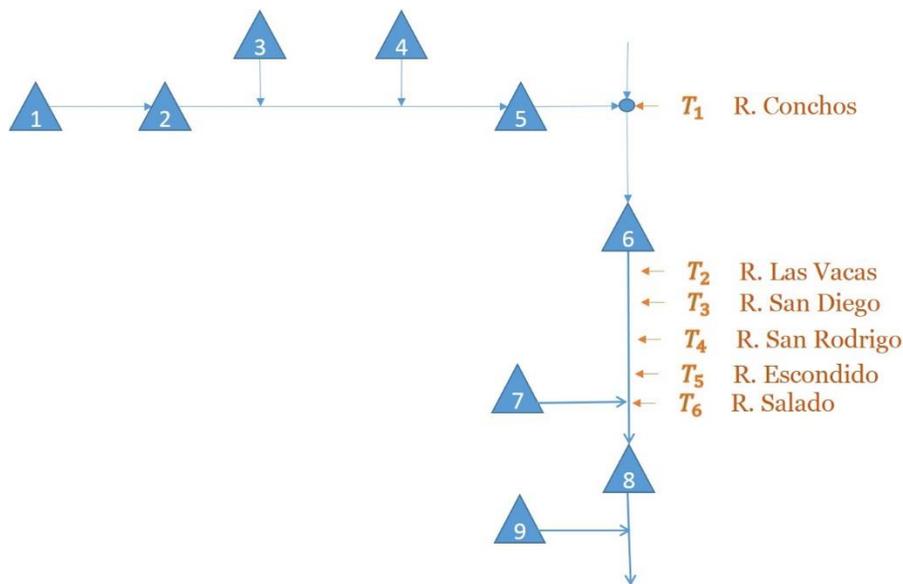


Figura 5-4. Concepción de puntos de pago del tratado de 1944 en el sistema cuenca Río Bravo.

Se realizó un análisis de los volúmenes aportados por cada uno de los seis puntos de entrega correspondientes. En el Anexo A, se encuentran las gráficas y datos correspondientes al análisis realizado con FDC 2.1, basado en la metodología descrita por Tallaksen & van Lannen (2004). El software permite generar una tabla con porcentajes de probabilidad de flujo calculados en pasos de 0.5 percentil. En la Figura 5.6, se observa el análisis para cada punto de pago en el sistema.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

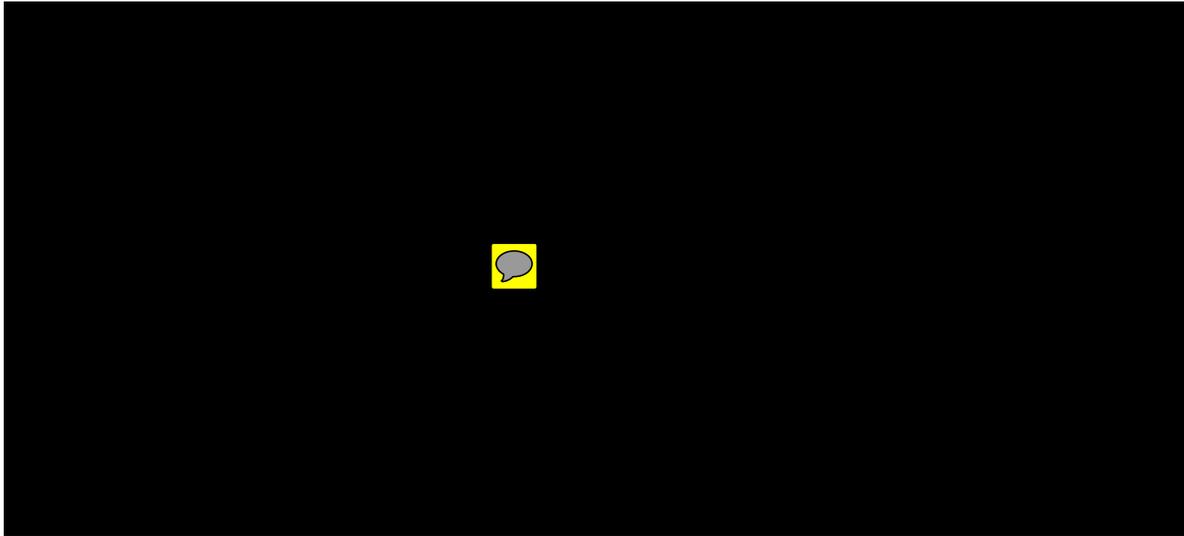


Figura 5-5. Probabilidad de pago del tratado de 1944 en el sistema cuenca Río Bravo.

El resultado obtenido de este análisis permitió fijar un volumen mínimo ρ , siendo el P_{34} para cada afluente del Río Bravo, descrito en la Tabla 5.2, permitiendo realizar el pago del tratado de 1944 en al menos 5 años (2,164.92 Mm³); con un pago anual total de al menos 432.98 Mm³, Figura 5.7. De esta manera, se sume la condición más crítica para cumplir con el tratado.

Tabla 5-2. Volúmenes mínimos para entrega anual para el pago del Tratado de 1944 de acuerdo al modelo histórico calibrado de la cuenca del Río Bravo en Riverware.

Punto de entrega	Vol. Anual (Mm ³)	Nomenclatura
Río Conchos	260.91	T ₁
Arroyo Las Vacas	3.39	T ₂
Río San Diego	55.35	T ₃
Río San Rodrigo	22.33	T ₄
Río Escondido	13.30	T ₅
Río Salado	77.71	T ₆

La Figura 5.7 es la curva maestra de flujo, es decir, la curva de duración de flujo que se realiza de manera aislada para cada año y se promedia el resultado obtenido para cada percentil.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

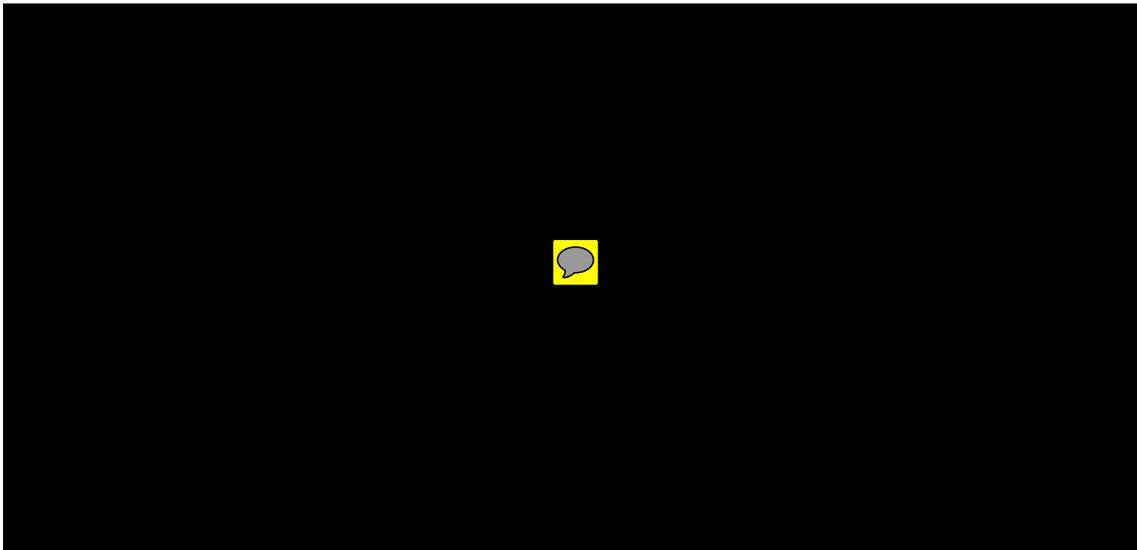


Figura 5-6. Curva maestra de flujos anuales para el pago del tratado de 1944 en el sistema cuenca Río Bravo.

Se identificó que el mayor aporte promedio al pago del T44 a Estados Unidos lo realiza la cuenca del Río Conchos con un promedio mínimo de entrega de al menos 260.91 Mm³ anuales, seguido por el río Salado con 77.71 Mm³ anuales, el Río San Diego aporta 55.35 Mm³ anuales, río San Rodrigo 22.33 Mm³ anuales, río Escondido 13.3 Mm³ anuales y el Arroyo Las Vacas 3.4 Mm³ anuales. La Figura 5.8, muestra los porcentajes relacionados a los volúmenes descritos con anterioridad.

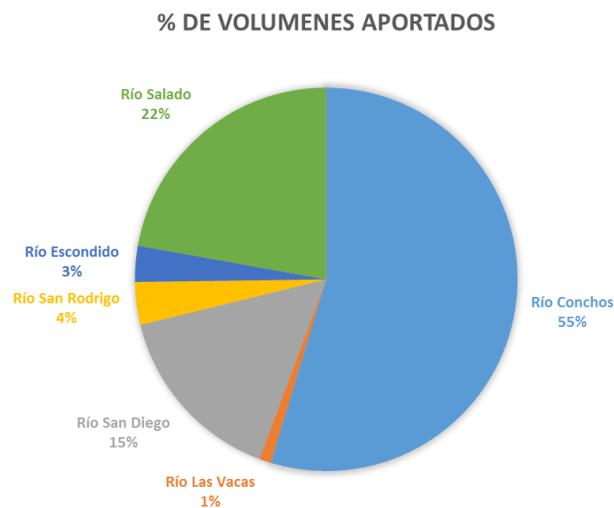
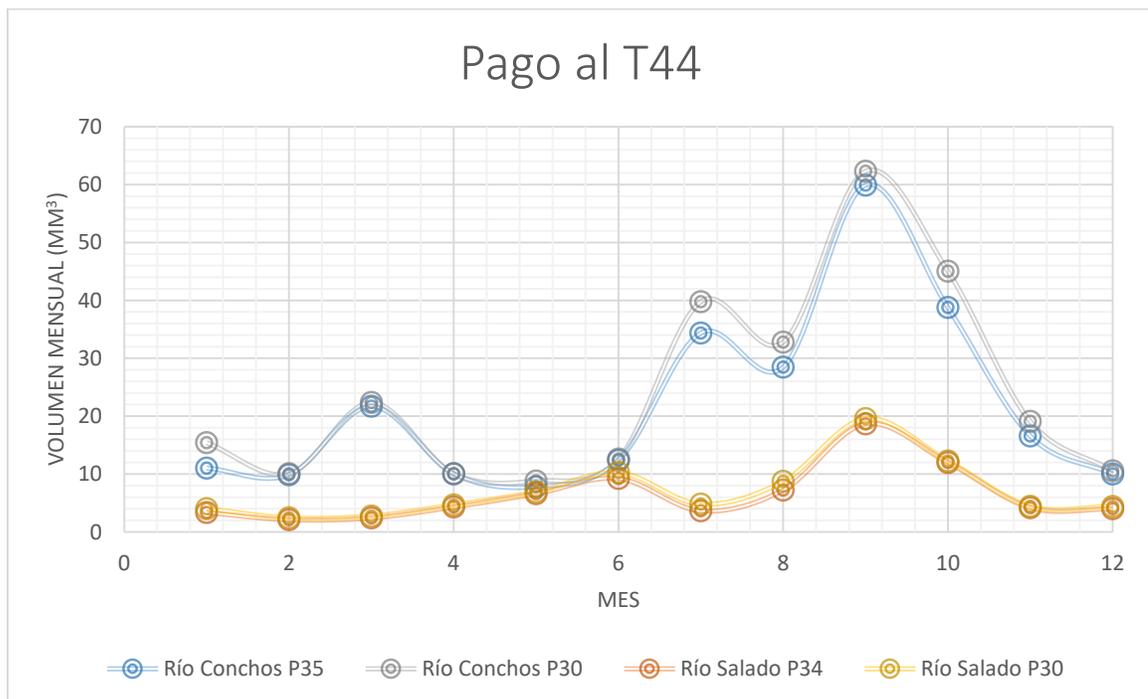


Figura 5-7. Proporciones de aportaciones por puntos de entrega en el Río Bravo para cumplimiento de T44.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

De acuerdo con la naturaleza de la optimización, se pretende optimizar el sistema en el pago del T_1 y T_6 , dado que estos están sujetos a la optimización de las presas aguas arriba, Luis L. León y Venustiano Carranza, respectivamente. La Figura 5.9, muestra la aportación mensual de los ríos Conchos y Salado, que en conjunto aportan el 78% del volumen de pago en el Tratado de 1944.

Figura 5-8. Aportaciones mensuales en los ríos Conchos y Salado para cumplimiento de T44: P₃₀ y P₃₄.



5.1. Escenarios

Se estableció el análisis de la optimización de dos escenarios objetivo que buscan condiciones diferentes en el cumplimiento de las concesiones. A continuación, se describe cada uno de ellos con mayor detalle.

Escenario 1

- Optimización de los *releases* (liberación de las presas) sin restricción alguna al pago de todas las concesiones incluyendo el Tratado de 1944.
- Volumen de pago por Río Conchos y Río Salado con límite superior asociado al P₃₄ (80% del volumen total al pago).

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

- Dos meses de almacenamiento para el pago de concesiones futuras en cada presa.

Escenario 2

- Se asegura el cumplimiento al 100 % del uso público-urbano y doméstico (PUD) en todo el sistema.
- Optimización de los *releases* (liberación de las presas) con restricción limitada a una diferencia de no menos del 5% entre las asignaciones 03 y 19, donde se encuentran los Distritos de Riego 05 “Delicias” y 025 “Bajo Río Bravo”, y el pago al tratado de 1944.
- Volumen de pago por Río Conchos y Río Salado con límite superior asociado al P₃₄ (80 % del volumen total al pago).
- Tres meses de almacenamiento para el pago de concesiones futuras en cada presa.

Volumen de pago P₃₄. Gasto pagado por el río Conchos de 260.9 hm³ anuales (60%) y río Salado de 77.7 Mm³ anuales (18 %). Gastos asociados al P₃₄ del análisis del apartado 5.2.3 de acuerdo a la contabilidad del modelo de Riverware® de la cuenca del río Bravo.

Si bien ambos escenarios se rigen por condiciones distintas, los dos optimizan las descargas derivadas de las presas del sistema de la región Bravo-Conchos con el objetivo de minimizar los déficits de asignación para todos los usuarios de la región. Esta medida representa un esfuerzo por distribuir de la mejor forma factible el agua de la cuenca, a la vez que intenta minimizar la inequidad en el acceso al recurso. Estas medidas no estructurales de gestión del riesgo de sequía tienen el objetivo de reducir el riesgo ante este fenómeno a través de acciones estratégicas y un adecuado uso de la infraestructura existente.

5.3.1. Escenario de evaluación del riesgo de sequía

El riesgo de sequía fue evaluado para las condiciones registradas entre 1994 y 2008. Este periodo fue elegido como escenario para la evaluación del riesgo de sequías, debido a que en éste tuvieron lugar dos de los tres eventos de sequía más severos que se reportaron en los últimos cuarenta años: el de 1992-1997 y el de 1997-2002 (ver la Figura 5-10 y la Figura 5-11).

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

De acuerdo con los índices reportados por el Monitor de Sequía Multivariado en México (MOSEMM). En la Figura 5-9, se observa una mayor presencia de Sequía Excepcional (D4) a partir de 1994.

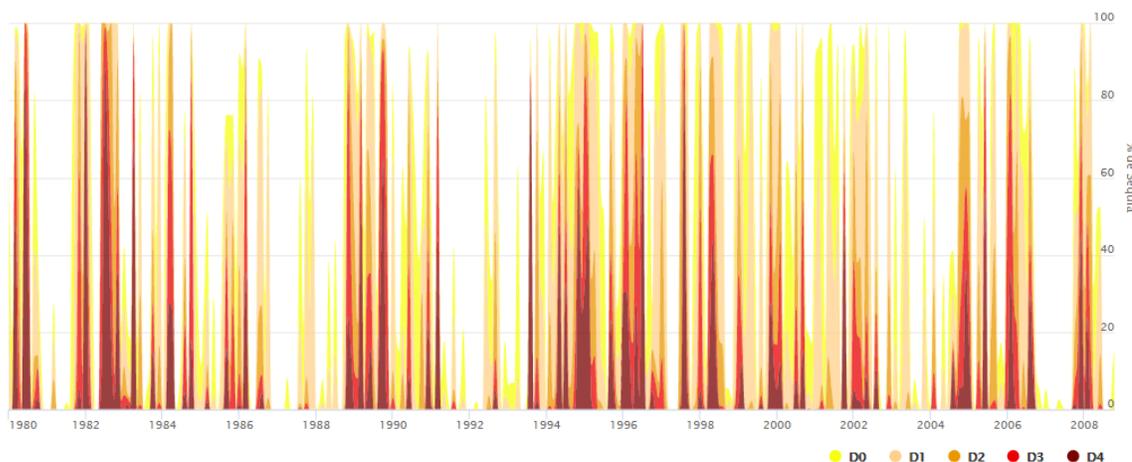


Figura 5-9. Sequía en la cuenca del Río Bravo. Fuente: CONAGUA.

La sequía de la región Bravo-Conchos 1992-1997 tuvo una duración de 57 meses —desde junio de 1992, hasta febrero de 1997— y sumó una magnitud de 35.4. Por su parte, la sequía 1997-2002 persistió durante 61 meses — desde junio de 1997, hasta junio de 2002— y alcanzó una magnitud de 59.3.

Este periodo representa un escenario sumamente adverso para la gestión de los recursos hídricos debido a las importantes restricciones de disponibilidad que representó para todos los usos en la región, de tal suerte que resulta un caso de estudio de gran interés la evaluación y mitigación del riesgo de sequías.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

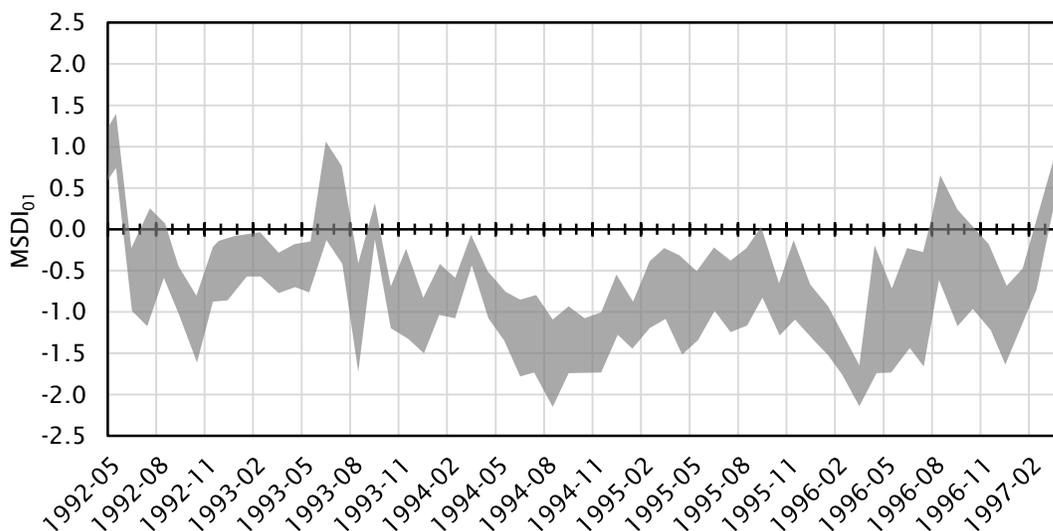


Figura 5-10. Variación del $MSDI_{01}$ en la región hidrológica Bravo-Conchos durante la sequía de 1992-1997. La banda gris representa al 50 % de la superficie de la región.

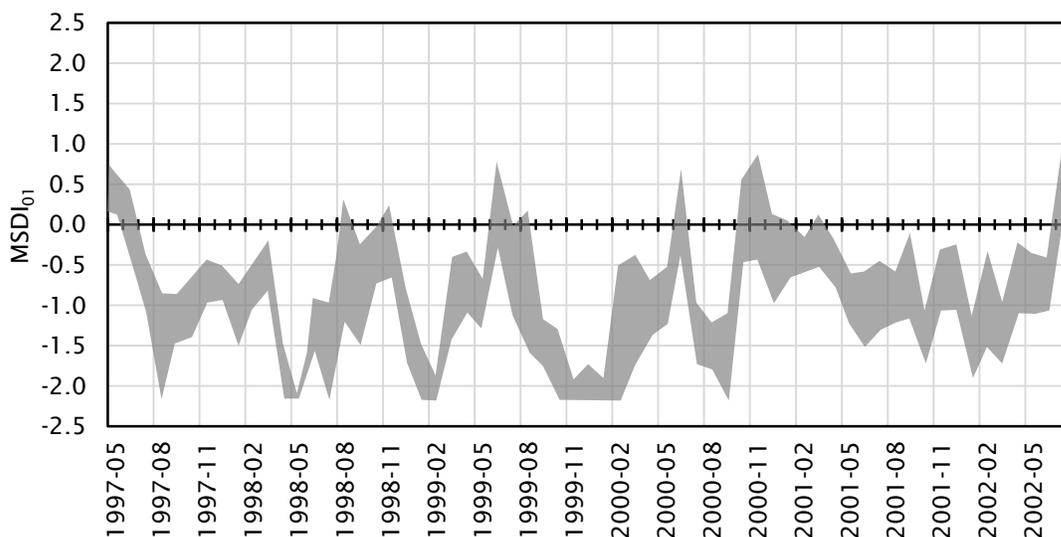


Figura 5-11. Variación del $MSDI_{01}$ en la región hidrológica Bravo-Conchos durante la sequía de 1997-2002. La banda gris representa al 50 % de la superficie de la región.

5.4. Datos y análisis

5.4.1. Caracterización de la amenaza

La amenaza por sequía fue caracterizada de dos maneras, cada una correspondiente a la escala temporal y espacial de la información de vulnerabilidad con la que se desea evaluar el riesgo. Así, para el caso de la vulnerabilidad del rendimiento agrícola, la amenaza está representada por el

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

déficit (estandarizado) acumulado anual de agua, calculado como se detalla en la Subsección 2.2.

De la Figura 5-12 a la Figura 5-16 se presentan los análisis de frecuencia del déficit acumulado para cada entidad federativa de la región Bravo-Conchos. Así mismo, la Tabla 5-3 resume los resultados del análisis para algunos valores umbrales.

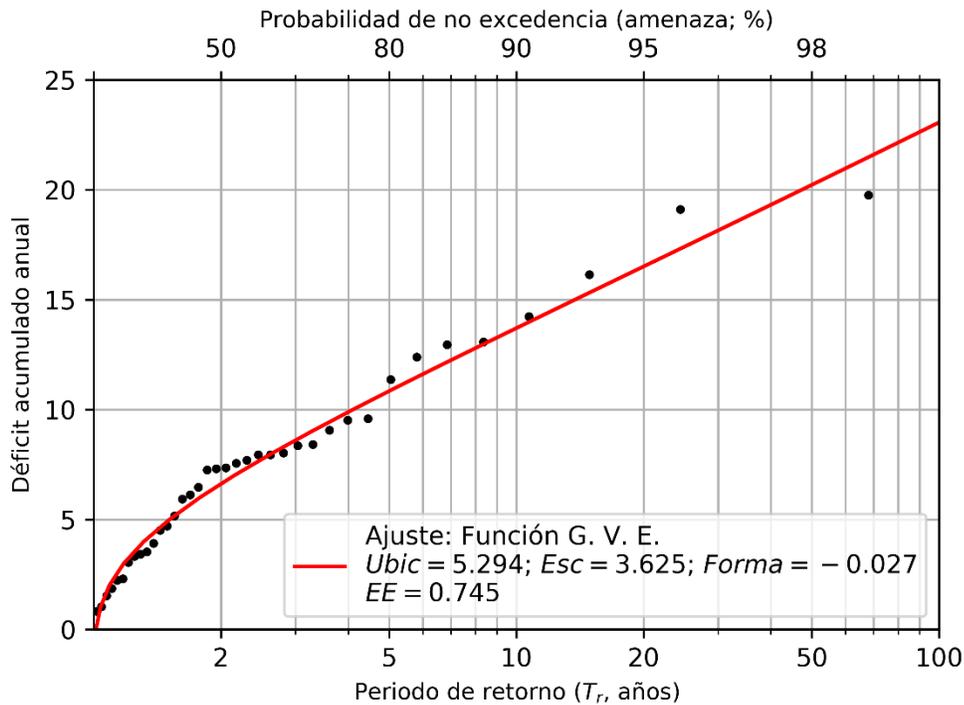


Figura 5-12. Análisis de frecuencia del déficit (estandarizado) acumulado anual de agua para el estado de Chihuahua.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

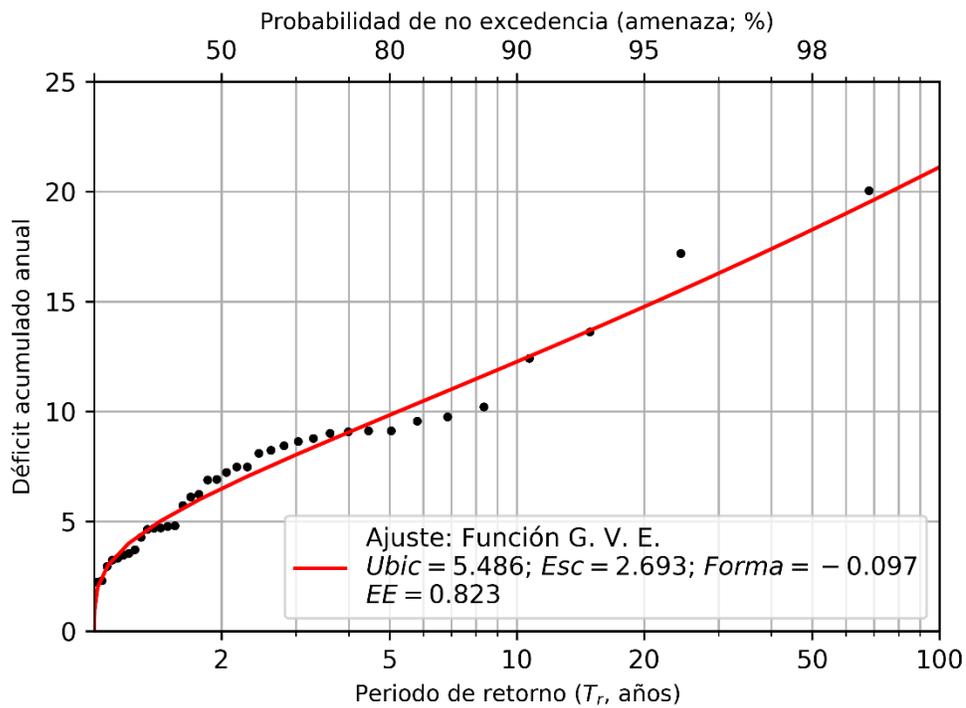


Figura 5-13. Análisis de frecuencia del déficit (estandarizado) acumulado anual de agua para el estado de Coahuila.

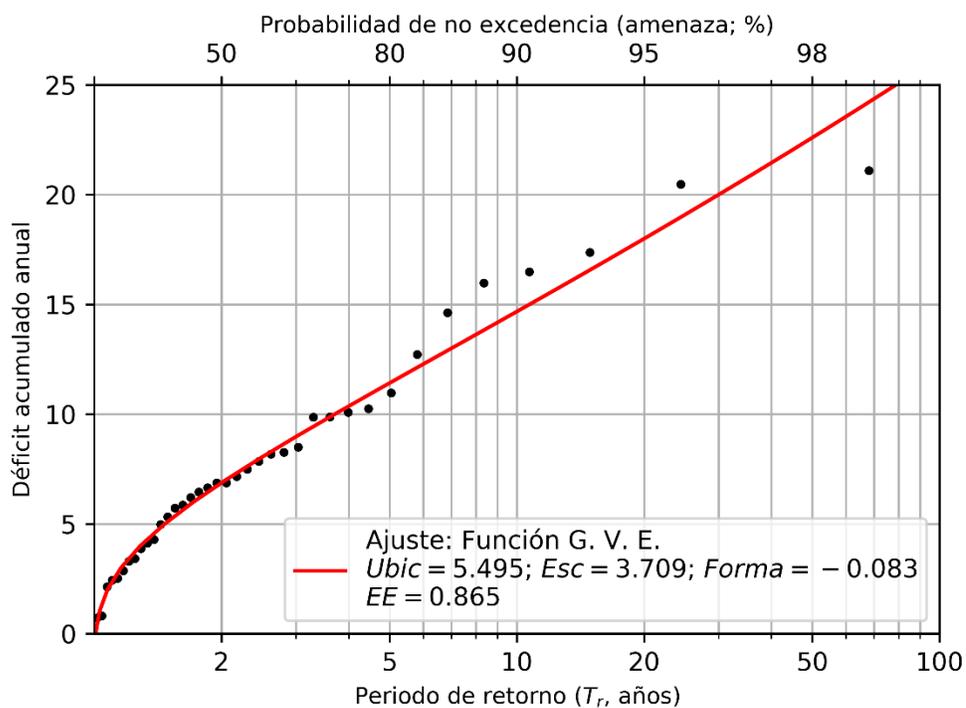


Figura 5-14. Análisis de frecuencia del déficit (estandarizado) acumulado anual de agua para el estado de Durango.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

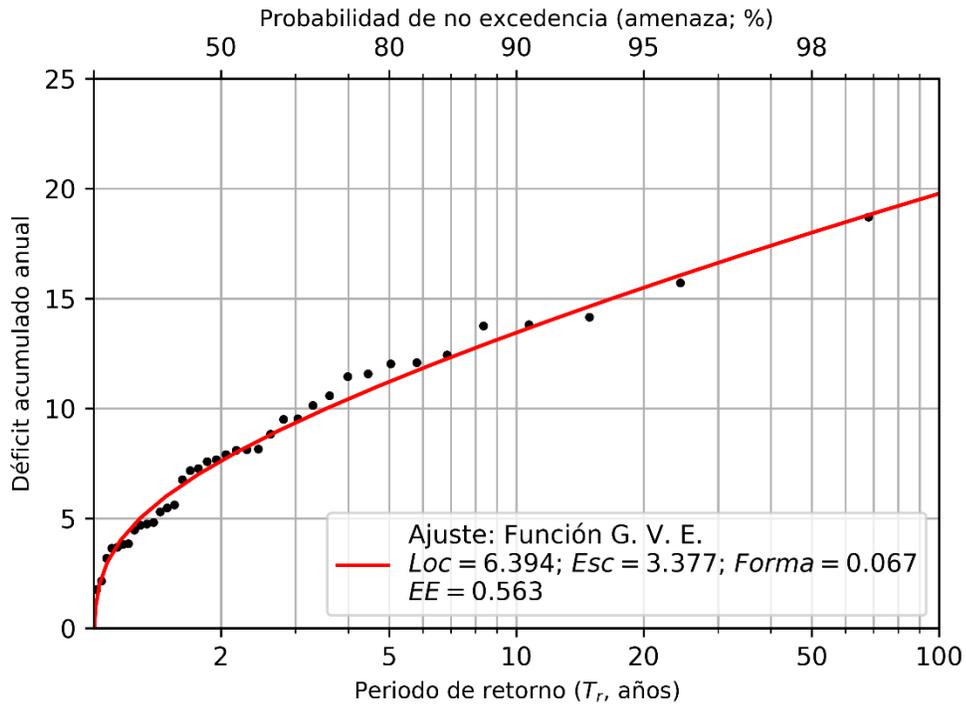


Figura 5-15. Análisis de frecuencia del déficit (estandarizado) acumulado anual de agua para el estado de Nuevo León.

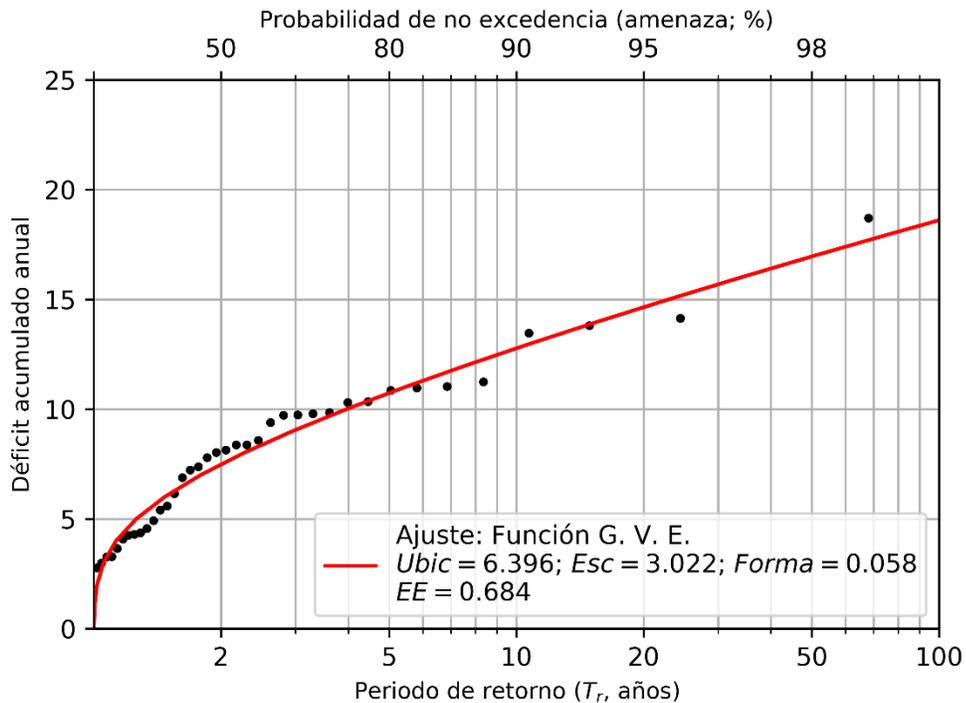


Figura 5-16. Análisis de frecuencia del déficit (estandarizado) acumulado anual de agua para el estado de Tamaulipas.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Tabla 5-3. Déficit (estandarizado) acumulado anual de agua asociado a distintos periodos de retorno para los estados de la región hidrológica Bravo-Conchos.

	Periodo de retorno en años (amenaza)					
	2 (50 %)	5 (80 %)	10 (90 %)	20 (95 %)	50 (98 %)	100 (99 %)
Chihuahua	6.629	10.845	13.709	16.512	20.223	23.067
Coahuila	6.491	9.835	12.260	14.760	18.266	21.111
Durango	6.875	11.420	14.675	17.993	22.595	26.286
Nuevo León	7.617	11.215	13.452	15.495	17.999	19.776
Tamaulipas	7.492	10.739	12.775	14.646	16.957	18.609

Por otra parte, fue caracterizada la amenaza en términos de la magnitud de los eventos de sequía, a partir de un análisis de frecuencia como el que se describe en la subsección 1.2. La Figura 5-17 y la Tabla 5-4 contienen el resultado de este análisis.

La información generada en este apartado servirá como insumo a la cuantificación del riesgo, más adelante.

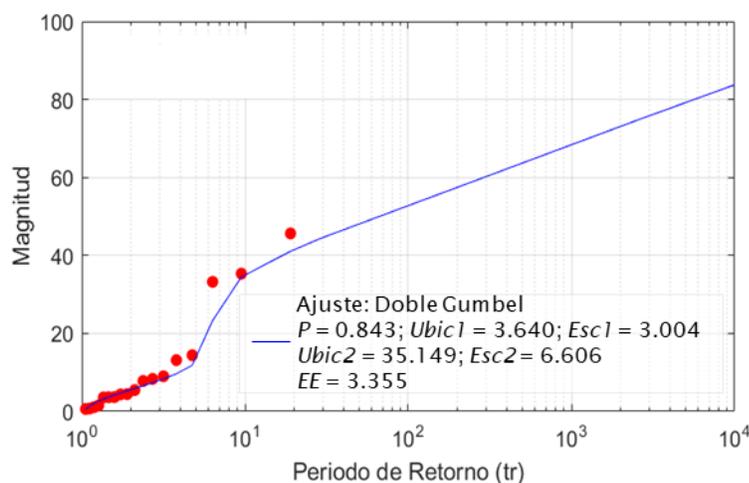


Figura 5-17. Análisis de frecuencia de magnitud de sequía para la región hidrológica Bravo-Conchos.

Tabla 5-4. Déficit (estandarizado) acumulado anual de agua asociado a distintos periodos de retorno para los estados de la región hidrológica Bravo-Conchos.

	Periodo de retorno en años (amenaza)					
	2 (50 %)	5 (80 %)	10 (90 %)	20 (95 %)	50 (98 %)	100 (99 %)
RH Bravo-Conchos	5.592	12.506	35.069	41.486	48.319	53.127

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

5.4.2. Modelo de optimización

Se realizó la optimización utilizando los datos históricos y con el método *Dual-Simplex* (programado en Matlab®). En el algoritmo dual simplex, el problema empieza como siendo óptimo, pero no factible. Sin embargo, las iteraciones sucesivas están diseñadas para avanzar hacia la factibilidad, respetando la optimalidad. Es importante aclarar que cuando se restaura la factibilidad en cualquier iteración, el algoritmo termina. El método *dual simplex* contrasta con el método regular (*primal simplex*), en el sentido de que las iteraciones empiezan factibles y no optimas, y no continúan siendo factibles hasta que se logra la factibilidad. El diseño de la optimización tiene dos objetivos a cumplir, mismos que se describen a continuación.

Los insumos necesarios en el diseño de la optimización se presentan a continuación.

- Almacenamientos al NAMINO
- Almacenamientos al NAMO
- Concesiones (P₅₀). Ver Anexo B
- Pérdidas (Metodología de Silva-Hidalgo (2010), con datos históricos y Release de presas optimizado y sus respectivos balances, Tabla 5.3)
- Almacenamiento inicial (octubre de cada año)
- Evaporación (función mensual para cada presa). Ver Anexo C.
- Entradas en el mes correspondientes a presas cabecera y a las entradas por cuenca propia.

Pérdidas

Se estableció realizar la optimización con el cálculo de pérdidas en los tramos mencionado en la Fig. 5.5., de acuerdo con las ecuaciones planteadas de cada subcuenca. En la Tabla 5.4, se observan las ecuaciones de cada subcuenca de acuerdo con la metodología de Silva-Hidalgo (2010).

Tabla 5-5. Ecuaciones de pérdidas en los tramos determinados de acuerdo al diseño de la optimización [Mm³/mes].

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Tramos	Subcuencas	Vpg
P_2	SC4	$P_{sc4} = \frac{(Car1 * Xr1) + (Cab1 * B1) + D1}{(1 - Cab1)};$
P_5	SC5	$P_{sc5} = \frac{(Car2 * Xr2) + (Cab2 * B2) + D2}{(1 - Cab2)};$
	SC6Y10	$P_{sc6y10} = \frac{(Car3 * (B3 + Xr3 + Xr4) + Cab3 * B4 + D3)}{(1 - Cab3)};$
	SC12II	$P_{sc12II} = \frac{(Car4 * B5) + Cab4 * B6 + D4}{(1 - Cab4)};$
P_6	SC13	$P_{sc13} = \frac{(Car5 * Xr5 + Cab5 * B7 + D5)}{(1 - Cab5)};$
	SC14ME XII	$P_{sc14MEXII} = \frac{(Car6 * B8 + Cab6 * B9 + (D6/2))}{(1 - Cab6)};$
	SC15ME X	$P_{sc15MEX} = \frac{(Car7 * B10 + Cab7 * B11 + (D7/2))}{(1 - Cab7)};$
	SC16	$P_{sc16} = \frac{(Car8 * B12 + Cab8 * B13 + (D8/2))}{(1 - Cab8)};$
P_8	SC17	$P_{sc17} = \frac{(Car9 * Xr6 + Cab9 * B15 + (D9/2))}{(1 - Cab9)};$
	SC20	$P_{sc20} = \frac{(Car10 * (B16 + In11 + In12) + Cab10 * B17 + (D10/2))}{(1 - Cab10)};$
	SC22	$P_{sc22} = \frac{(Car11 * B18 + Cab11 * B19 + (D11/2))}{(1 - Cab11)};$
	SC24	

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Tramos	Subcuencas	Vpg
	SC25	$P_{sc24} = \frac{(Car12 * B20 + Cab12 * B21 + (D^{12}/2))}{(1 - Cab12)};$
	SC29VP G	$P_{sc25} = \frac{(Car13 * B22 + Cab13 * B23 + (D^{13}/2))}{(1 - Cab13)};$
	SC28I	$P_{sc29VPG} = \frac{(Car14 * B24 + Cab14 * B25 + (D^{14}/2))}{(1 - Cab14)};$ $P_{sc28I} = \frac{(Car15 * Xr7 + Cab15 * B26 + D15)}{(1 - Cab15)};$
P_G	SC35 I	$P_{sc35I} = \frac{(Car16 * Xr9 + Cab16 * B27 + D16)}{(1 - Cab16)};$
	SC36 Mex	$P_{sc36MEX} = \frac{(Car17 * Xr8 + Cab17 * B28 + (D^{17}/2))}{(1 - Cab17)};$
	SC37	$P_{sc37} = \frac{(Car18 * B29 + Cab18 * B30 + (D^{18}/2))}{(1 - Cab18)};$

Las ecuaciones de balance que refieren en cada ecuación de pérdida de la Tabla 5.3 se desarrollan a continuación.

$$B_1 = Xr1 - a1 + In1;$$

$$B_2 = Xr2 + In2 - a2;$$

$$B_3 = B2 - Psc5;$$

$$B_4 = Xr3 + Xr4 + In3 + In4 + In5 - a3 - a4 - a5 + B3;$$

$$B_5 = B_4 - Psc6y10 - a6;$$

$$B_6 = B_5 + In6 - a7;$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

$$B_7 = Xr5 + In7 - a8;$$

$$B_8 = (B_7 - Psc13) * (2/3);$$

$$B_9 = B_8 + In8 - a9;$$

$$B_{10} = B_9 - Psc14MEXII;$$

$$B_{11} = B_{10} + In9 - a10;$$

$$B_{12} = B_{11} - Psc15MEX;$$

$$B_{13} = B_{12} + In10;$$

$$B_{14} = Xr6$$

$$B_{15} = B_{14} - a11;$$

$$B_{16} = B_{15} - Psc17 + In11 + In12;$$

$$B_{17} = B_{16} + In13 - a12;$$

$$B_{18} = B_{17} - Psc20 + In14;$$

$$B_{19} = B_{18} + In15 - a13;$$

$$B_{20} = B_{19} - Psc22 + In16;$$

$$B_{21} = B_{20} + In17 - a14;$$

$$B_{22} = B_{21} - Psc24;$$

$$B_{23} = B_{22} + In18 - a15;$$

$$B_{24} = B_{23} - Psc25;$$

$$B_{25} = B_{24} + In19 - a16 + ((B_{26} - Psc28I) * (2/3));$$

$$B_{26} = Xr7 + In20 - a17;$$

$$B_{27} = Xr9 + In21 - a18;$$

$$B_{28} = B_{27} - Psc35I + In22 - a19 + Xr8;$$

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

$$B_{29} = B_{28} - Psc36MEX;$$

$$B_{30} = B_{29} + In23 - a20;$$

Modelos de evaporación anual

De acuerdo con el diseño de la optimización se requirió la obtención de ecuaciones de primer orden que permitieran inferir la evaporación (y) a nivel presa de acuerdo con el almacenamiento (x). Para ello se aplicó una regresión lineal a los datos históricos anuales de estas variables. Se observan los resultados obtenidos en la Tabla 5.4. y Figura 5.10.

Tabla 5-6. Modelos anuales de evaporación por presa.

Presa	Ecuación	r^2
San Gabriel	$0.837 + 0.125x$	0.95
Pico de Águila	$0.063 + 0.190x$	0.95
La Boquilla	$42.79 + 0.101x$	0.84
Fco. I. Madero	$18.18 + 0.106x$	0.54
Luis L. León	$3.32 + 0.107x$	0.93
La Amistad	$32.89 + 0.128x$	0.90
V. Carranza	$36.374 + 0.222x$	0.92
Falcón	$135.784 + 0.150x$	0.81
Marte	$91.125 + 0.198x$	0.78

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

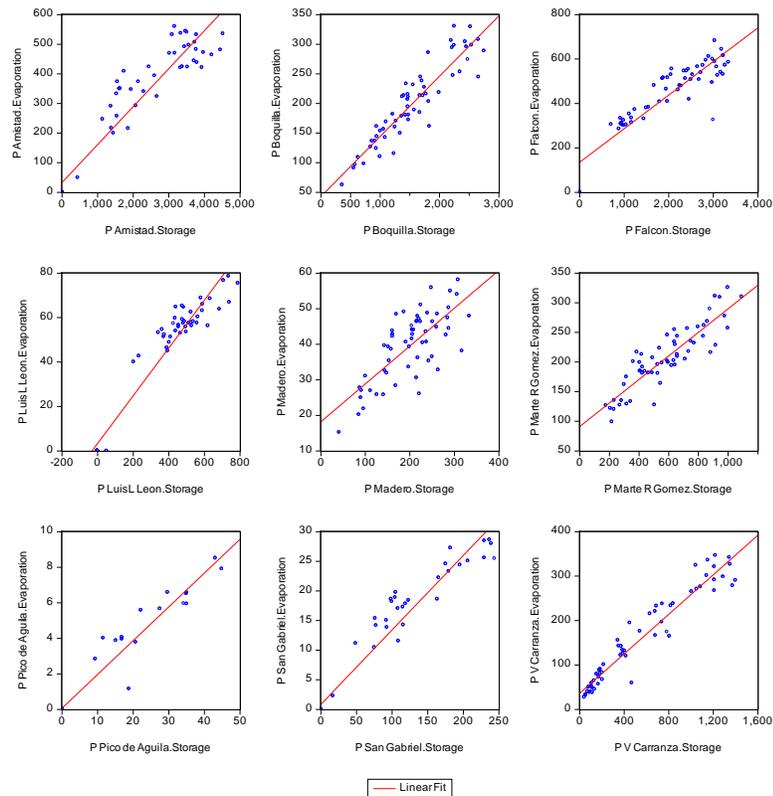


Figura 5-18. Regresión lineal de almacenamientos y evaporación anual por presa.

Los modelos obtenidos para cada presa a nivel mensual se encuentran en el Anexo C del presente informe.

Entradas

Además de las entradas del mes anterior en las presas de cabecera, se incorporan en cada tramo entradas provenientes del escurrimiento propio de cada subcuenca; adicionalmente, existen entradas que traen consigo el comportamiento de la extracción de concesiones que se realizan sobre escurrimientos que llegan al cauce principal. Para cada una de las entradas consideradas, se aplicó el registro histórico del modelo calibrado. La Fig. 5.11. esquematiza la localización de las entradas mencionadas en todo el sistema.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Esquema de Entradas (Aportación por CP) [In]

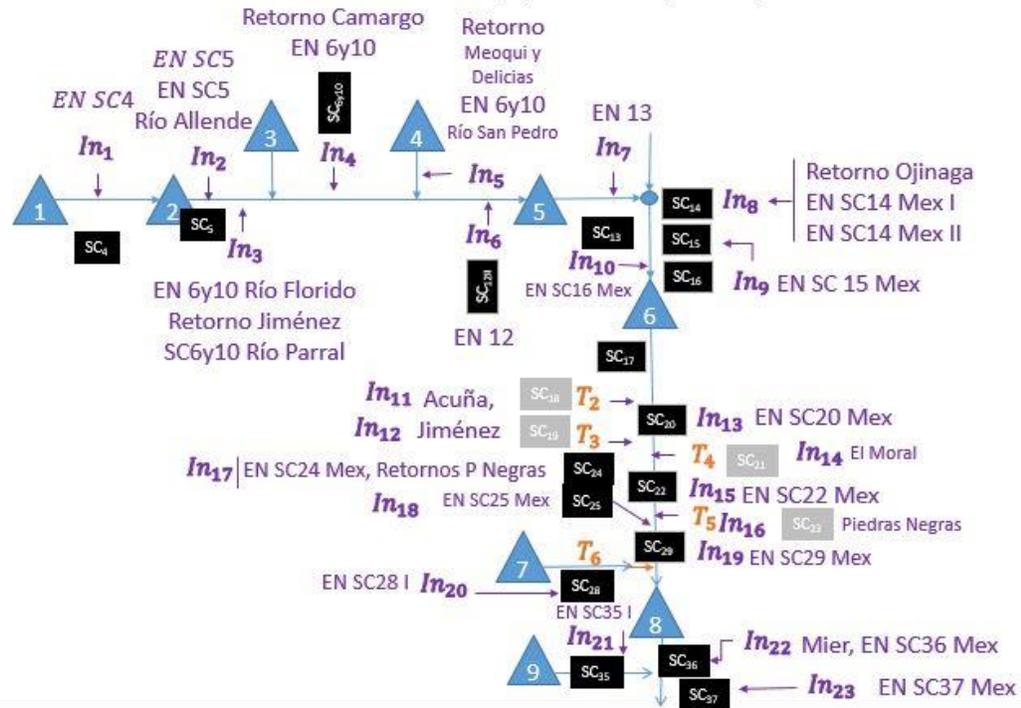


Figura 5-19. Entradas por cuenca propia y entradas con extracciones sobre escurrimientos de orden menor al cauce principal.

5.4.1. Riesgo de sequía sin medidas de gestión (escenario base)

Rendimiento agrícola

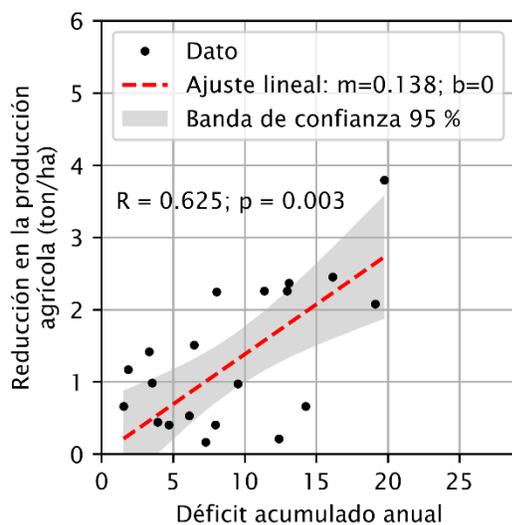
La información disponible al momento de llevar a cabo el presente análisis permitió construir funciones de daño del sector agrícola en la región Bravo-Conchos en términos del rendimiento de producción anual (calendario agrícola) por estado. Para este ejercicio, se empleó información de volumen total (incluyendo todos los cultivos) y superficie cultivada; no obstante, el origen de la información (<https://www.gob.mx/siap>) y el procedimiento para estimar las funciones pueden ser aplicados de la misma forma en un análisis por cultivo.

De la Figura 5-20 hasta la Figura 5-24 se muestran las funciones de daño obtenidas con base en los registros disponibles (1980-2016). Debido a la limitada extensión de registros, se optó por ajustar la información a funciones lineales, con intersección en el origen ($b = 0$). En los casos de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, fueron removidos del análisis registros

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

considerados discordantes (puntos marcados en color rojo) con el comportamiento general de las series temporales.

Con ayuda de las funciones ajustadas, es posible determinar el grado de vulnerabilidad en términos cuantitativos para cada nivel de amenaza. Cabe señalar en este punto, que fue evitado el uso de unidades monetarias (pesos mexicanos) para evitar que la inflación de los precios de los productos agrícolas durante el periodo consultado influyera en el resultado.

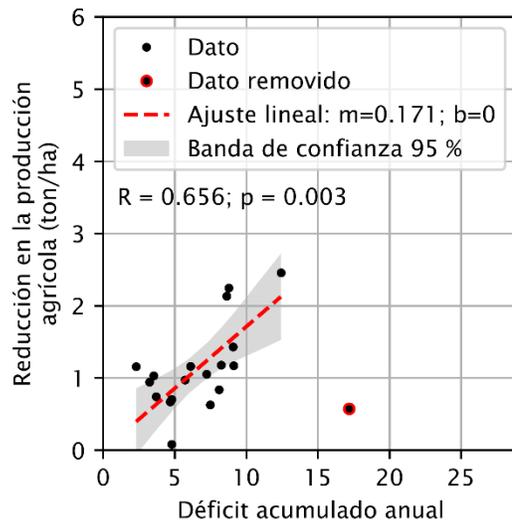


Déficit estandarizado acumulado de agua (adimensional)	Reducción en la producción (ton/ha)
0.0	0.00
1.0	0.138
3.0	0.415
6.0	0.829
12.0	1.658
18.0	2.488
24.0	3.317

Función de ajuste: $y = 0.138x$

Figura 5-20. Reducción en la producción agrícola (ton/ha) en el estado de Chihuahua como función del déficit de agua.

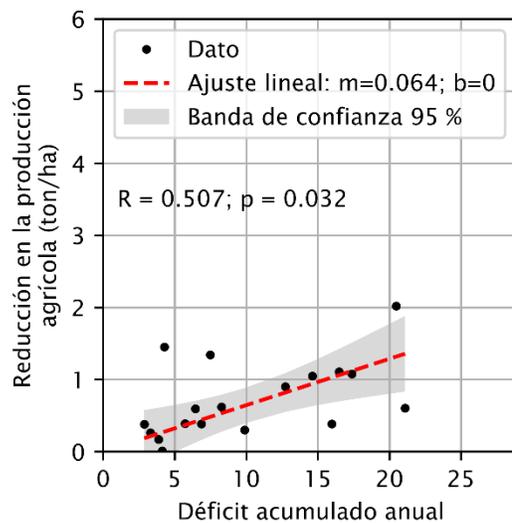
5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA



Déficit estandarizado acumulado de agua (adimensional)	Reducción en la producción (ton/ha)
0.0	0.00
1.0	0.171
3.0	0.513
6.0	1.026
12.0	2.052
18.0	3.079
24.0	4.105

Función de ajuste: $y = 0.171x$

Figura 5-21. Reducción en la producción agrícola (ton/ha) en el estado de Coahuila como función del déficit de agua.

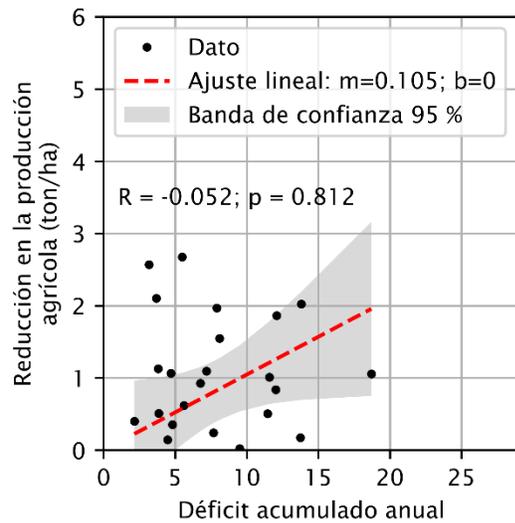


Déficit estandarizado acumulado de agua (adimensional)	Reducción en la producción (ton/ha)
0.0	0.00
1.0	0.064
3.0	0.193
6.0	0.386
12.0	0.772
18.0	1.158
24.0	1.544

Función de ajuste: $y = 0.064x$

Figura 5-22. Reducción en la producción agrícola (ton/ha) en el estado de Durango como función del déficit de agua.

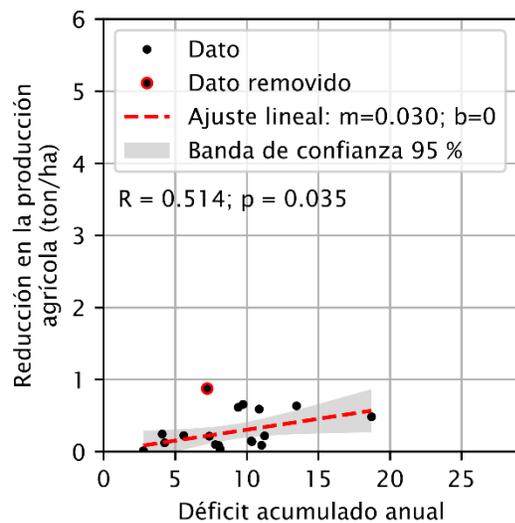
5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA



Déficit estandarizado acumulado de agua (adimensional)	Reducción en la producción (ton/ha)
0.0	
1.0	
3.0	
6.0	
12.0	
18.0	
24.0	

No se encontró una correlación significativa

Figura 5-23. Reducción en la producción agrícola (ton/ha) en el estado de Nuevo León como función del déficit de agua.



Déficit estandarizado acumulado de agua (adimensional)	Reducción en la producción (ton/ha)
0.0	0.00
1.0	0.030
3.0	0.091
6.0	0.182
12.0	0.364
18.0	0.545
24.0	0.727

Función de ajuste: $y = 0.030x$

Figura 5-24. Reducción en la producción agrícola (ton/ha) en el estado de Tamaulipas como función del déficit de agua.

La información presentada permite estimar el daño anual esperado (DAE) para cada estado de la región en términos de la pérdida de producción agrícola debida al déficit de agua.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Tabla 5-7. Reducción de la producción agrícola (ton/ha) ante la ocurrencia de déficit de agua asociados a distintos periodos de retorno para los estados de la región hidrológica Bravo-Conchos y sus daños anuales esperados (DAE).

	Periodo de retorno en años (amenaza)						DAE (reducción de la producción; ton/ha)
	2 (50 %)	5 (80 %)	10 (90 %)	20 (95 %)	50 (98 %)	100 (99 %)	
Chihuahua	0.916	1.499	1.895	2.282	2.795	3.188	0.742
Coahuila	1.110	1.682	2.097	2.524	3.124	3.611	0.842
Durango	0.442	0.735	0.944	1.158	1.454	1.691	0.368
Nuevo León ^(*)	0.797	1.174	1.408	1.621	1.883	2.069	0.573
Tamaulipas	0.225	0.325	0.387	0.444	0.514	0.564	0.159

(*) Derivado de una función de daños con correlación no significativa.

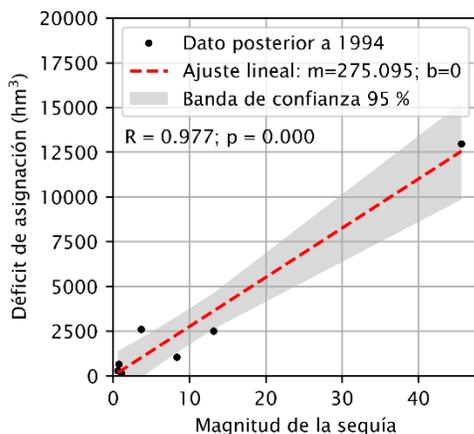
Asignación de agua

Otra perspectiva desde la que fue evaluada la vulnerabilidad de la región ante sequías fue a través del análisis del déficit histórico de asignación de agua a los distintos usuarios. La información necesaria para realizar esta revisión fue proporcionada por la CONAGUA, derivada del modelo del sistema de ríos y almacenamientos de la región Bravo-Conchos RiverWare®, que será descrito más adelante.

La información disponible incluye valores mensuales de déficit de asignación (es decir, volumen entregado entre concesionado) desde 1950 hasta 2008. No obstante, se encontró una significativa diferencia entre los valores previos a 1994 y los posteriores a este año. Esta discrepancia es debida, quizá, a la reorganización de los derechos de agua ocurrida al entrar en vigor la Ley de Aguas Nacionales, en 1992.

Tomando en cuenta únicamente los registros posteriores a 1994, la porción resultante de la muestra (1994-2008) queda muy limitada (apenas 15 años) para representar una relación funcional entre la severidad de la sequía y el déficit de asignación. La Figura 5-25 muestra la función lineal derivada para toda la región Bravo-Conchos.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA



Magnitud de la sequía	Déficit de asignación (hm³)
0.0	0.0
1.0	275.1
3.0	825.3
6.0	1 650.6
12.0	3 301.2
18.0	4 951.7
24.0	6 602.3

Función de ajuste: $y = 275.095x$

Figura 5-25. Déficit de asignación de agua (hm³) en la región hidrológica Bravo-Conchos como función de la magnitud de sequía en el escenario histórico.

Tabla 5-8. Déficit de asignación de agua (hm³) ante la ocurrencia de una sequía con magnitud asociada a distintos periodos de retorno para la región hidrológica Bravo-Conchos y sus daños anuales esperados (DAE) en el escenario histórico.

	Periodo de retorno en años (amenaza)						DAE (déficit de asignación; hm³)
	2 (50 %)	5 (80 %)	10 (90 %)	20 (95 %)	50 (98 %)	100 (99 %)	
RH Bravo-Conchos	1 538	3 440	9 647	11 412	13 292	14 615	2 438

5.4.2. Riesgo de sequía con medidas de gestión

Los resultados se presentan en la Tabla 5-9 y Tabla 5-10 de los escenarios 1 y 2 respectivamente. Se muestra a nivel anual el porcentaje de cumplimiento promedio de acuerdo con los ciclos agrícolas, según la política de presas internacionales (Nov-Oct). Se observa que en los ciclos 96-97 y 07-08, existe un cumplimiento muy cercano al 100% para ambos escenarios en todo el sistema, debido a que las entradas en presas de cabecera registradas históricamente corresponden a la climatología de años húmedos. En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14, se observan los almacenamientos de cada presa para cada escenario planteado de acuerdo con la optimización realizada y los almacenamientos históricos de acuerdo con el modelo de Riverware® de la cuenca del río Bravo.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Tabla 5-9. Porcentaje (%) de cumplimiento de concesiones periodo 1994-2008, bajo el Escenario 1.

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c1.1	DR103-1	50.50	65.79	100	45.87	73.83	75.36	61.11	64.54	60.86	77.23	83.98	77.17	98.30	91.83	73.31
c1.2	Extr Ab DR PC SC4.Agrícola	52.87	61.47	100	55.12	82.55	71.31	67.07	65.26	62.24	82.80	87.26	74.54	96.01	95.76	75.30
c1.3	Extr Ab DR PC SC4.Doméstico	53.65	62.39	100	53.31	80.95	70.51	66.82	65.53	62.62	85.74	86.87	75.38	97.38	94.44	75.40
c1.4	Extr Ab DR PC SC4.Otros	53.84	62.24	100	53.35	81.17	70.56	66.74	66.46	63.04	85.48	87.02	75.46	97.46	94.15	75.50
c2.1	DR103-2	30.51	48.32	86.49	44.70	55.03	38.94	40.32	47.56	35.03	60.14	58.42	64.68	72.81	65.57	53.46
c2.2	DR103-3	30.19	47.64	86.54	44.13	55.18	38.64	40.40	46.87	34.49	59.82	58.98	67.34	73.47	65.70	53.53
c2.3	Extr Ar DR PC SC5 Agrícola, Extr Ab DR PC SC5.a	46.17	58.20	86.08	63.10	66.91	53.45	46.08	61.81	48.80	66.99	67.95	70.76	75.24	73.62	63.23
c2.4	Extr Ab DR PC SC5.o	64.32	66.69	81.86	61.70	74.23	64.28	56.99	77.04	74.11	74.23	69.76	78.96	67.44	81.14	70.91
c3.1	DR 05	100	73.95	96.18	97.40	56.24	80.66	77.49	54.43	33.75	47.65	87.23	68.12	97.43	95.19	76.12
c3.2	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	100	83.71	91.49	95.64	74.03	83.28	79.51	78.12	66.23	73.87	84.45	86.99	95.48	95.64	84.89
c3.3	Extr Ab DR PC SC6y10.d	100	83.70	91.28	95.90	74.96	84.99	79.16	76.71	71.72	74.47	84.02	87.45	95.12	95.95	85.39

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c3.4	Extr Ab DR PC SC6y10:Otros,Extr Ab DR PC SC6y10.o	99.99	83.62	93.26	95.80	73.31	82.22	78.66	74.70	70.34	76.17	82.74	86.25	96.77	95.91	84.98
c4.1	DR 05 San Pedro	83.11	100	90.23	94.00	100	100	99.55	100	100	100	93.31	100	93.96	93.90	96.29
c4.2	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	91.61	100	91.75	95.86	100	100	97.00	100	100	100	93.19	100	95.88	95.82	97.22
c5.1	Extr FC SC6y10 Rio Florido Agrícola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c6.1	Extr Ab DR PC SC6y10 Agrícola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c6.2	Exp SC6y10 Imp SC12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c7.1	Extr Ab DR PC SC12.a	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c7.2	Extr Ab DR PC SC12.o	99.99	100	100	100	100	100	100	100	99.98	100	99.96	100	100	100	99.99
c8.1	DR 090	100	95.98	91.78	79.96	82.87	89.40	87.62	87.77	88.05	99.04	86.50	92.29	88.22	96.67	90.44
c8.2	Extr Ar DR PC SC13.a	100	90.49	91.80	79.98	79.90	86.90	88.17	88.69	92.01	97.64	87.62	85.00	89.01	92.49	89.26
c8.3	Extr Ar DR PC SC13.d	100	87.56	92.21	78.45	78.25	83.44	83.88	86.05	91.68	95.80	82.32	82.84	84.92	89.12	86.89
c8.4	Extr Ar DR PC SC13.O	100	87.56	92.23	78.49	78.27	83.44	83.92	86.06	91.68	95.80	82.33	82.86	84.95	89.11	86.91

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c9.1	Extr PC SC14 I Agricola	100	94.25	91.85	80.61	84.56	86.43	92.94	93.90	93.42	100	89.89	84.35	88.53	93.30	91.00
c9.2	Extr PC SC14 I.d	100	91.62	91.44	78.99	83.10	83.05	91.07	91.56	91.67	100	87.49	82.95	86.27	90.43	89.26
c9.3	Extr PC SC14 I.o, Extr PC SC14 II Otro	100	91.70	92.16	79.05	83.40	83.02	90.42	91.40	91.68	99.99	88.11	83.13	87.51	91.07	89.47
c10.1	Extr PC SC15.a	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c10.2	Extr PC SC15.o	99.99	99.95	100	99.95	99.95	99.82	99.97	99.91	99.99	99.99	99.92	99.87	99.98	99.93	99.94
c11.1	Extr Cd Acuna	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c12.1	DR 06 M3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.1	DR 050 SC 22	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.2	Extr PC SC22 Agricola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.3	Extr Piedras Negras	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.4	Extr PC SC22 Domestico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c14.1	DR 050 SC 24	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c14.2	Extr PC SC24 Agricola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c14.3	Extr CFE SC24	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.97	100	99.99	100	100
c14.4	Extr PC SC22 Domestico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.1	DR 050 SC 25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.2	Extr Ar DR PC SC25 Agrícola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.3	Extr SC25 Mex: Nuevo Laredo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.4	Extr Ar DR PC SC25 Domestico; Extr SC25 Mex: Ab DR PC SC25 Domestico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c16.1	DR 050 SC 29	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c16.2	Nva Cd Guerrero	60.16	1.72	52.34	15.11	26.84	82.31	18.83	0.27	6.59	100	100	23.60	41.38	78.11	43.38
c17.1	DR 004 Don Martin	74.24	44.98	43.36	38.21	58.99	65.85	42.09	24.38	53.24	96.68	97.74	65.37	69.45	90.09	61.76
c17.2	Extr Ab DR PC SC28 l:Agricola	74.03	59.09	48.87	51.14	67.13	62.01	57.27	50.70	61.64	95.53	96.22	70.83	72.94	91.49	68.49
c17.3	Extr Ab DR PC SC28 l:Otros	54.44	30.07	43.74	14.56	26.58	18.63	51.19	65.00	100	100	100	100	100	100	64.59
c18.1	DR 026	100	100	89.81	87.91	87.88	89.19	91.17	96.90	100	100	100	100	100	100	95.92

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c19.1	DR 025	100	100	95.30	94.42	95.03	96.05	93.95	94.68	100	100	100	100	100	100	97.82
c19.2	DR 026 SC36	100	100	95.72	95.52	95.25	96.60	94.47	95.02	100	100	100	100	100	100	98.04
c19.3	Ciudad Mier, M Alemán, Díaz Ordaz, Reynosa	100	100	95.87	97.07	95.68	93.40	96.66	95.45	100	100	100	100	100	100	98.15
c19.4	Extr Ab DR PC SC36:Domestico	100	100	96.22	96.85	95.40	96.14	95.63	95.23	100	100	100	100	100	100	98.25
c19.5	Extr Ab DR PC SC36:Otros,Extr Ab DR PC SC36:Perdida por creciente	100	100	93.70	91.67	91.67	91.67	91.67	100	100	100	100	100	100	100	97.17
c20.1	Ciudad Bravo	100	100	93.64	91.67	91.67	91.67	91.67	100	100	100	100	100	100	100	97.16
c20.2	ExtrSC37:Agrícola	100	100	92.00	91.67	91.67	91.67	91.67	100	100	100	100	100	100	100	97.05
c20.3	ExtrSC37:Otros,ExtrSC37:C Retamal	100	98.05	93.37	89.59	88.45	92.72	91.65	93.52	93.95	100	95.97	94.22	93.65	96.85	94.43
Tp1	Río Conchos	74.58	45.81	43.65	39.10	58.94	62.59	41.92	23.31	54.12	98.83	99.51	64.20	70.66	89.02	61.87
Tp6	Río Salado	89.37	86.26	91.51	83.26	85.79	86.67	84.64	84.89	85.84	93.75	93.31	89.91	93.16	95.13	88.82
Promedio		89.37	86.26	91.51	83.26	85.79	86.67	84.64	84.89	85.84	93.75	93.31	89.91	93.16	95.13	88.82

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

5.4.3 Riesgo con medidas de gestión

Tabla 5-10. Porcentaje (%) de cumplimiento de concesiones periodo 1994-2008, bajo el Escenario 2.

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c1.1	DR103-1	50.50	67.03	96.62	40.42	66.60	75.33	60.84	64.57	60.43	72.87	78.41	74.60	97.83	91.53	71.25
c1.2	Extr Ab DR PC SC4.Agrícola	50.55	67.28	95.63	50.40	80.60	70.80	69.64	67.42	64.90	83.01	88.21	75.24	95.90	95.74	75.38
c1.3	Extr Ab DR PC SC4.Doméstico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c1.4	Extr Ab DR PC SC4.Otros	56.38	65.76	96.62	49.33	96.89	71.93	82.77	78.89	82.49	100	87.57	75.68	96.20	94.81	81.10
c2.1	DR103-2	30.43	47.99	85.98	36.50	55.96	39.18	39.92	47.54	34.37	61.07	59.03	63.59	72.53	65.58	52.83
c2.2	DR103-3	29.57	47.67	86.40	35.77	55.35	38.72	40.15	46.88	33.87	60.57	59.24	65.67	73.10	65.63	52.76
c2.3	Extr Ar DR PC SC5 Agrícola, Extr Ab DR PC SC5.a	46.75	57.49	86.39	58.14	67.10	53.66	47.17	61.36	48.36	70.65	68.11	71.87	74.60	73.77	63.24
c2.4	Extr Ab DR PC SC5.o	100	88.50	90.93	100	100	100	100	100	100	100	75.80	100	70.69	83.71	93.54
c3.1	DR 05	99.78	73.99	100	90.55	58.32	80.65	77.12	54.44	33.62	47.64	87.23	68.06	97.42	95.17	76.00
c3.2	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	96.70	86.37	100	79.87	82.44	83.28	77.89	77.77	66.42	74.60	85.82	87.10	95.37	95.68	84.95
c3.3	Extr Ab DR PC SC6y10.d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c3.4	Extr Ab DR PC SC6y10:Otros,Extr Ab DR PC SC6y10.o	94.21	90.44	99.99	85.75	83.28	81.25	81.80	75.65	72.16	74.50	83.19	90.37	96.49	95.88	86.07
c4.1	DR 05 San Pedro	82.64	99.92	100	88.59	99.93	100	86.20	99.98	99.51	99.98	93.92	99.06	94.03	94.00	95.56
c4.2	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	90.82	99.03	100	85.14	99.87	99.93	93.92	99.49	97.62	98.37	94.90	94.51	95.86	95.75	96.09
c5.1	Extr FC SC6y10 Rio Florido Agrícola	93.89	96.51	100	81.62	97.12	96.84	88.96	97.43	91.57	94.45	99.99	91.14	100	100	94.96
c6.1	Extr Ab DR PC SC6y10 Agrícola	97.92	99.98	100	97.69	99.81	99.99	96.27	99.79	96.07	99.71	100	97.46	100	100	98.90
c6.2	Exp SC6y10 Imp SC12	98.75	99.99	100	98.85	99.89	100	97.62	99.95	98.84	99.84	100	99.11	100	100	99.49
c7.1	Extr Ab DR PC SC12.a	92.67	99.83	100	94.42	99.38	99.95	96.23	99.36	96.47	97.84	100	95.72	100	100	97.99
c7.2	Extr Ab DR PC SC12.o	99.45	96.80	99.99	84.17	100	97.43	99.66	100	96.27	100	99.99	93.28	99.95	100	97.64
c8.1	DR 090	99.48	97.81	91.31	74.27	82.38	89.01	85.21	89.71	87.41	98.87	86.63	91.53	87.72	96.98	89.88
c8.2	Extr Ar DR PC SC13.a	94.86	93.52	91.61	72.64	78.99	86.69	83.63	91.64	91.47	96.25	88.10	81.59	89.09	92.53	88.04
c8.3	Extr Ar DR PC SC13.d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c8.4	Extr Ar DR PC SC13.O	93.04	88.72	92.76	74.70	96.10	80.59	100	96.54	97.69	100	83.34	81.08	84.32	91.13	90.00

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c9.1	Extr PC SC14 I Agrícola	94.70	94.02	91.54	76.47	85.15	86.77	87.59	92.40	91.51	99.25	90.44	83.29	88.84	92.96	89.64
c9.2	Extr PC SC14 I.d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c9.3	Extr PC SC14 I.o, Extr PC SC14 II Otro	93.39	88.89	92.74	74.59	95.33	80.18	98.01	100	100	100	87.70	82.81	86.93	91.01	90.83
c10.1	Extr PC SC15.a	92.56	98.27	100	88.91	97.77	98.83	91.98	97.58	94.85	95.62	100	93.88	100	100	96.45
c10.2	Extr PC SC15.o	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.69	100	99.97	99.81	99.96
c11.1	Extr Cd Acuna	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c12.1	DR 06 M3	96.84	99.79	100	94.41	99.09	99.99	94.61	99.39	95.71	97.20	100	95.24	100	100	98.02
c13.1	DR 050 SC 22	92.68	98.59	100	90.20	97.55	99.48	90.72	98.30	97.87	95.36	100	98.25	100	100	97.07
c13.2	Extr PC SC22 Agrícola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.3	Extr Piedras Negras	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c13.4	Extr PC SC22 Domestico	97.41	99.97	100	96.53	99.71	99.99	89.13	99.78	97.60	99.82	100	96.31	100	100	98.30
c14.1	DR 050 SC 24	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c14.2	Extr PC SC24 Agrícola	95.71	99.87	100	94.83	99.60	99.98	95.67	99.54	95.74	98.56	100	95.96	100	100	98.25

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c14.3	Extr CFE SC24	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c14.4	Extr PC SC22 Domestico	98.74	99.98	100	98.21	99.85	99.99	93.06	99.91	96.80	99.76	100	98.26	100	100	98.90
c15.1	DR 050 SC 25	97.86	99.44	100	94.74	98.39	99.92	92.33	98.78	97.88	96.48	100	98.29	100	100	98.15
c15.2	Extr Ar DR PC SC25 Agrícola	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.3	Extr SC25 Mex: Nuevo Laredo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c15.4	Extr Ar DR PC SC25 Domestico; Extr SC25 Mex: Ab DR PC SC25 Domestico	99.04	99.99	100	98.64	99.87	99.99	93.39	99.92	97.43	99.77	100	98.66	100	100	99.05
c16.1	DR 050 SC 29	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c16.2	Nueva Cd Guerrero	31.09	1.69	52.36	15.35	26.76	82.47	17.79	0.28	6.68	99.98	100	23.26	41.56	78.17	41.25
c17.1	DR 004 Don Martin	56.57	45.47	43.24	37.41	59.03	65.30	41.78	24.24	52.65	96.55	98.14	65.92	68.52	89.65	60.32
c17.2	Extr Ab DR PC SC28 I:Agricola	59.27	59.99	48.40	50.33	69.67	63.22	60.13	53.10	64.89	93.19	95.72	72.10	73.02	91.38	68.17
c17.3	Extr Ab DR PC SC28 I:Otros	54.90	30.57	44.06	13.28	26.50	18.63	51.01	64.72	99.86	99.95	100	99.95	100	100	64.53
c18.1	DR 026	99.93	100	89.87	87.67	87.71	89.07	90.97	96.79	99.96	99.97	100	99.97	100	100	95.85

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Concesión	Objeto	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-00	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	Promedio
c19.1	DR 025	97.37	99.97	95.28	89.68	95.39	96.54	87.53	94.78	99.12	97.38	100	99.38	100	100	96.60
c19.2	DR 026 SC36	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c19.3	Ciudad Mier, M Alemán, Díaz Ordaz, Reynosa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c19.4	Extr Ab DR PC SC36:Domestico	96.33	99.91	96.13	93.03	97.07	95.95	91.29	95.06	95.53	98.60	100	95.71	100	100	96.76
c19.5	Extr Ab DR PC SC36:Otros,Extr Ab DR PC SC36:Perdida por creciente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
c20.1	Ciudad Bravo	94.33	99.81	93.09	83.22	91.01	91.13	85.51	99.30	98.75	97.13	100	95.96	100	100	94.95
c20.2	ExtrSC37:Agricola	99.16	99.99	91.76	90.57	91.57	91.66	87.18	99.94	98.94	99.87	100	98.97	100	100	96.40
c20.3	ExtrSC37:Otros,ExtrSC37:C Retamal	99.27	97.52	93.41	87.72	88.33	92.97	88.39	93.40	93.78	99.94	95.95	93.91	93.93	96.22	93.91
Tp1	Río Conchos	58.93	45.82	43.84	38.19	59.11	62.21	41.88	23.19	53.54	98.71	99.44	64.98	69.76	88.65	60.59
Tp6	Río Salado	87.80	88.14	92.81	81.98	88.85	88.76	85.53	87.35	87.34	94.62	94.50	90.31	93.75	95.71	89.82
Promedio		87.80	88.14	92.81	81.98	88.85	88.76	85.53	87.35	87.34	94.62	94.50	90.31	93.75	95.71	89.82

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

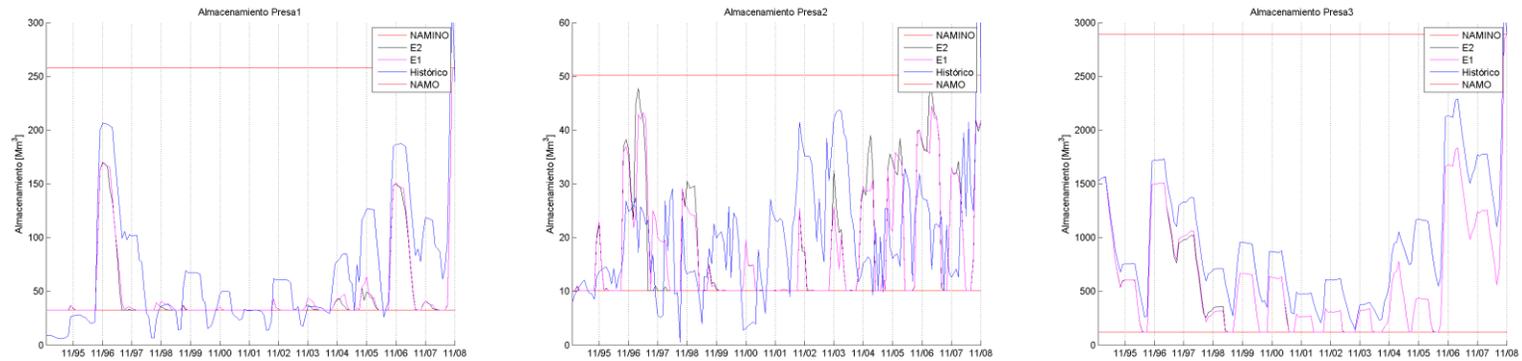


Figura 5-26. Almacenamiento histórico en las presas San Gabriel, Pico de Águila y Boquilla del sistema optimizado.

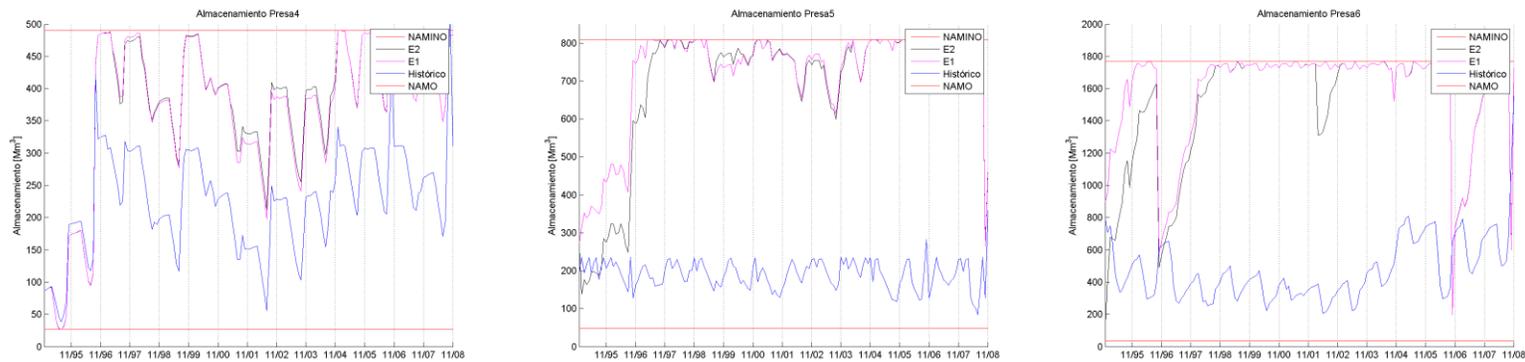


Figura 5-27. Almacenamiento histórico en las presas Madero, Luis L. León y Amistad del sistema optimizado.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

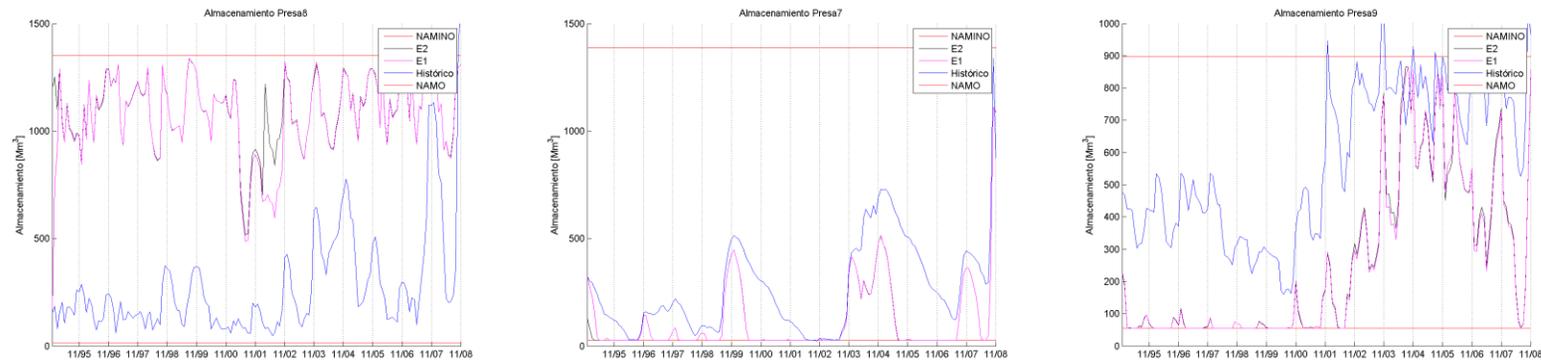


Figura 5-28. Almacenamiento histórico en las presas Venustiano Carranza, Falcón y Marte R. Gómez del sistema optimizado.

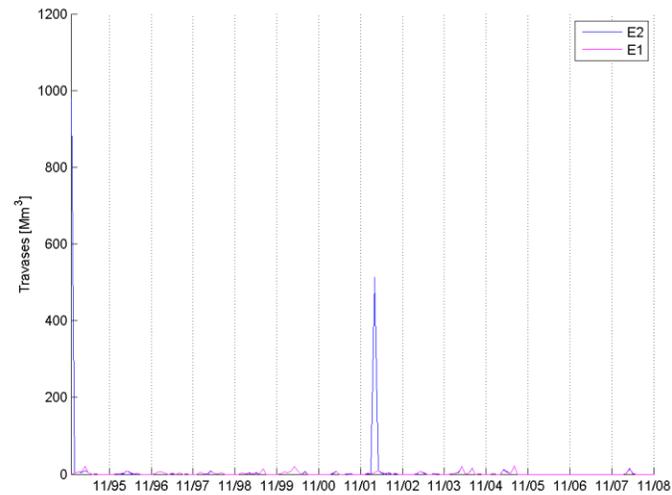


Figura 5-29. Travases recibidos en la presa Pico de águila de acuerdo al sistema optimizado de Escenario 1 y 2.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

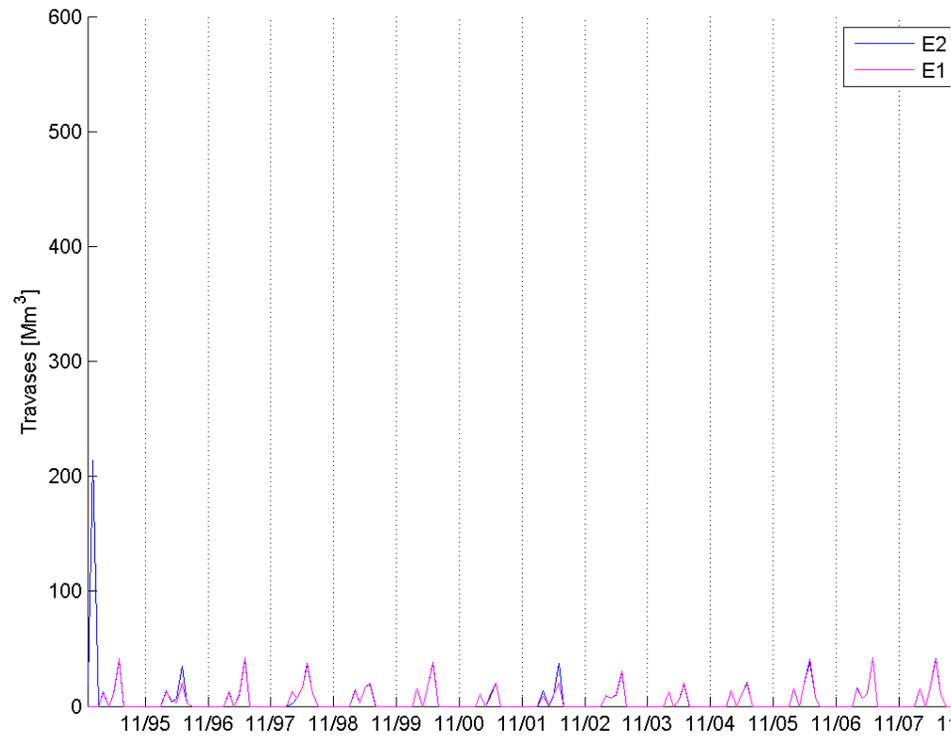


Figura 5-30. Trasvases recibidos en la presa Luis L. León de acuerdo al sistema optimizado de Escenario 1 y 2.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

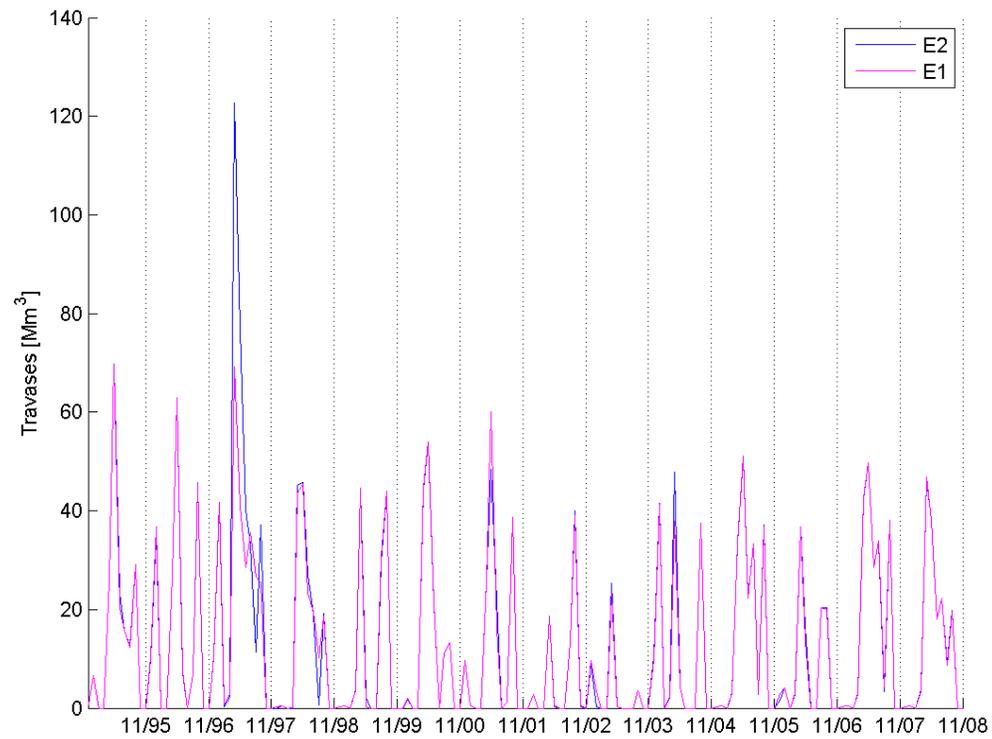


Figura 5-31. Traveses recibidos en la presa Amistad de acuerdo al sistema optimizado de Escenario 1 y 2.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

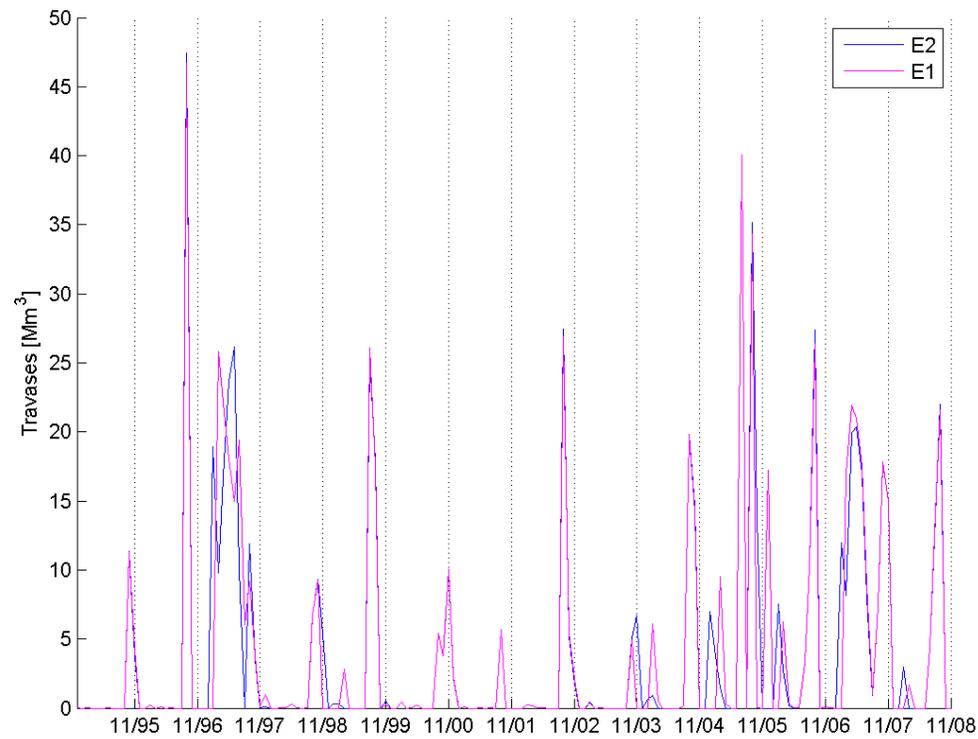
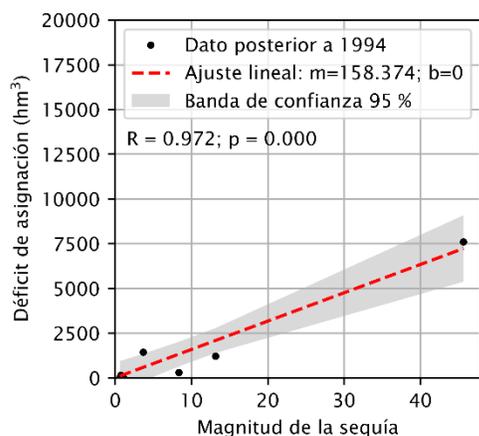


Figura 5-32. Trasvases recibidos en la presa Falcón de acuerdo al sistema optimizado de Escenario 1 y 2.

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA



Magnitud de la sequía	Déficit de asignación (hm³)
0.0	0.0
1.0	158.4
3.0	475.1
6.0	950.2
12.0	1 900.5
18.0	2 850.7
24.0	3 801.0

Función de ajuste: $y = 158.374x$

Figura 5-33. Déficit de asignación de agua (hm³) en la región hidrológica Bravo-Conchos como función de la magnitud de sequía, en el escenario optimizado.

Tabla 5-11. Déficit de asignación de agua (hm³) ante la ocurrencia de una sequía con magnitud asociada a distintos periodos de retorno para la región hidrológica Bravo-Conchos y sus daños anuales esperados (DAE) en el escenario optimizado.

	Periodo de retorno en años (amenaza)						DAE (déficit de asignación; hm³)
	2 (50 %)	5 (80 %)	10 (90 %)	20 (95 %)	50 (98 %)	100 (99 %)	
RH Bravo-Conchos	886	1 981	5 554	6 570	7 652	8 414	1 403

5.5. Conclusiones

De acuerdo con un límite superior de concesiones acotado a 4,464.97 hm³ en toda la cuenca del Río Bravo, y al porcentaje de cumplimiento a las mismas, bajo el presente esquema de optimización con las condiciones marcadas en ambos escenarios, se debe de considerar una disminución alrededor de 12 % en los volúmenes concesionados.

Escenario 1

El cumplimiento de las concesiones bajo el Escenario 1, marca un porcentaje promedio de la serie histórica de 89%. Concesiones objetivo como el DR 05 y DR 025, marca un % de cumplimiento promedio de 76 % y 98 %, respectivamente. El volumen requerido para el pago del Tratado de 1944 cuenta con un % de cumplimiento promedio de 75 %.

En el E1, se observa que en el primer quinquenio de la serie histórica (94-95/98-99) existe un cumplimiento promedio de las concesiones de 87 %. Para

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

el tercer quinquenio de la serie histórica (03-04/07-08) existe un cumplimiento promedio de las concesiones de 93 %.

Con respecto al porcentaje en los almacenamientos optimizados se observó que, en las presas de mayor interés, Amistad y Falcón, el porcentaje promedio anual de almacenamiento es de 89 % y 79 %, respectivamente.

De manera particular, el problema se acentúa en cuencas cabecera donde solo se logra optimizar las asignaciones sin posibilidades de trasvasar agua. Tal es el caso de las concesiones abastecidas por la presa San Gabriel, sólo se llega al 73 % de cumplimiento promedio. Entre estas concesiones se encuentran el Módulo 1 del DR 103. Un caso más crítico refiere a la presa Venustiano Carranza que solo logra cumplir con el 62 % de las concesiones (DR 04 “Don Martín”).

Escenario 2

El cumplimiento de las concesiones marca un porcentaje promedio de 90 %. Concesiones objetivo como el DR 05 y DR 025, marca un % de cumplimiento promedio de 76 % y 97 %, respectivamente. El volumen requerido para el pago del Tratado de 1944 cuenta con un % de cumplimiento promedio de 75 %.

En el E1, se observa que en el primer quinquenio de la serie histórica (94-95/98-99) existe un cumplimiento promedio de las concesiones de 88%. Para el tercer quinquenio de la serie histórica (03-04/07-08) existe un cumplimiento promedio de las concesiones de 94 %.

Con respecto al porcentaje en los almacenamientos optimizados se observó que en las presas de mayor interés, Amistad y Falcón, el porcentaje promedio anual de almacenamiento es de 84 % y 80 %, respectivamente.

Se denota que no existe una diferencia significativa de los resultados de ambos escenarios de acuerdo con el índice de porcentaje de cumplimiento promedio anualizada, al menos en la serie histórica analizada (1994-2008).

Los resultados reportados se deberán tomar con precaución debido a que las ecuaciones de pérdidas de acuerdo con Silva (2010), se encuentran calibradas bajo el funcionamiento histórico del sistema de presas en la cuenca del Río Bravo.

A. Análisis de FDC de los afluentes de pago en el T44

Análisis del Río conchos



5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Arrollo Las Vacas



5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Río San Diego



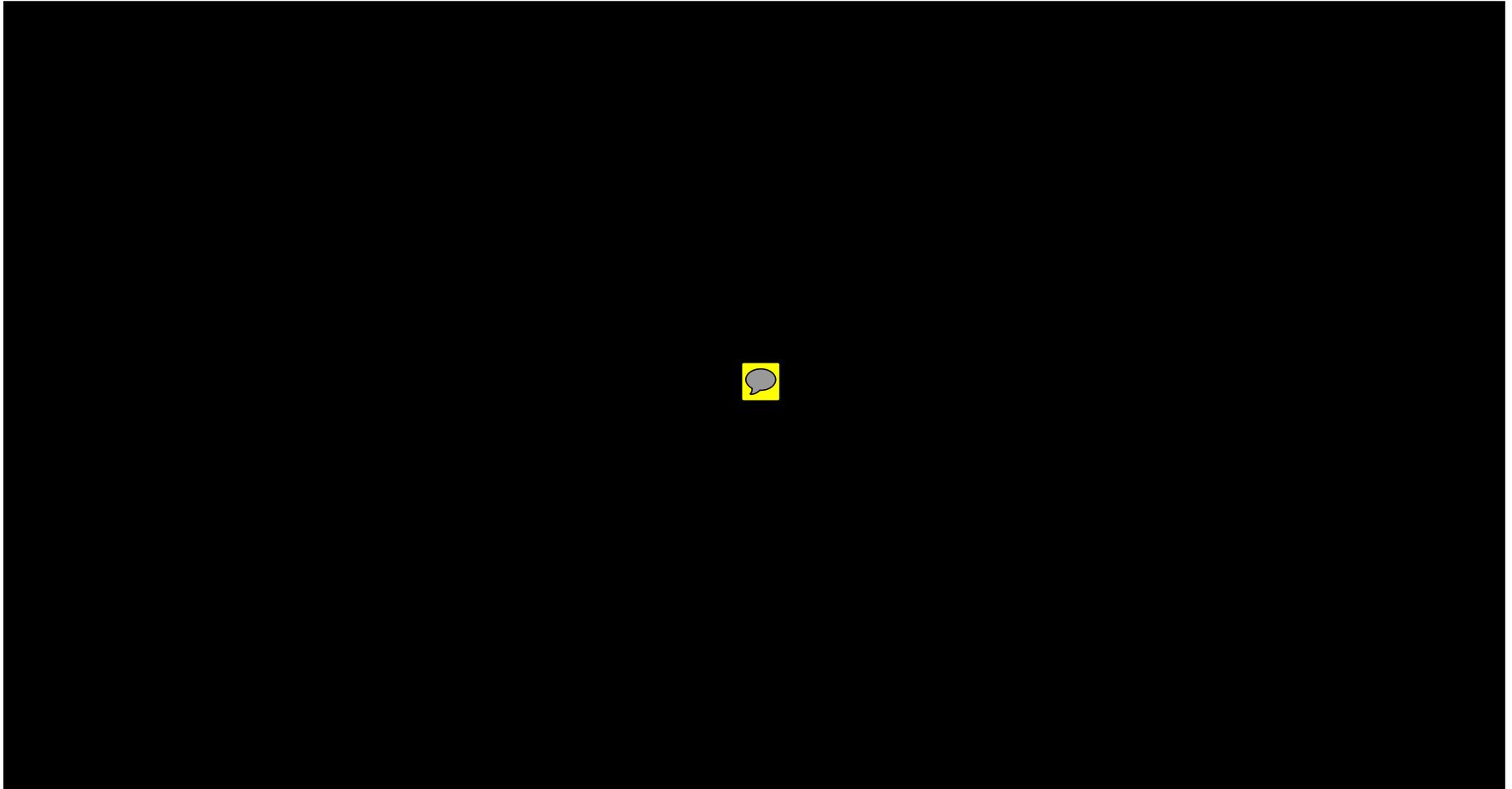
5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Río San Rodrigo



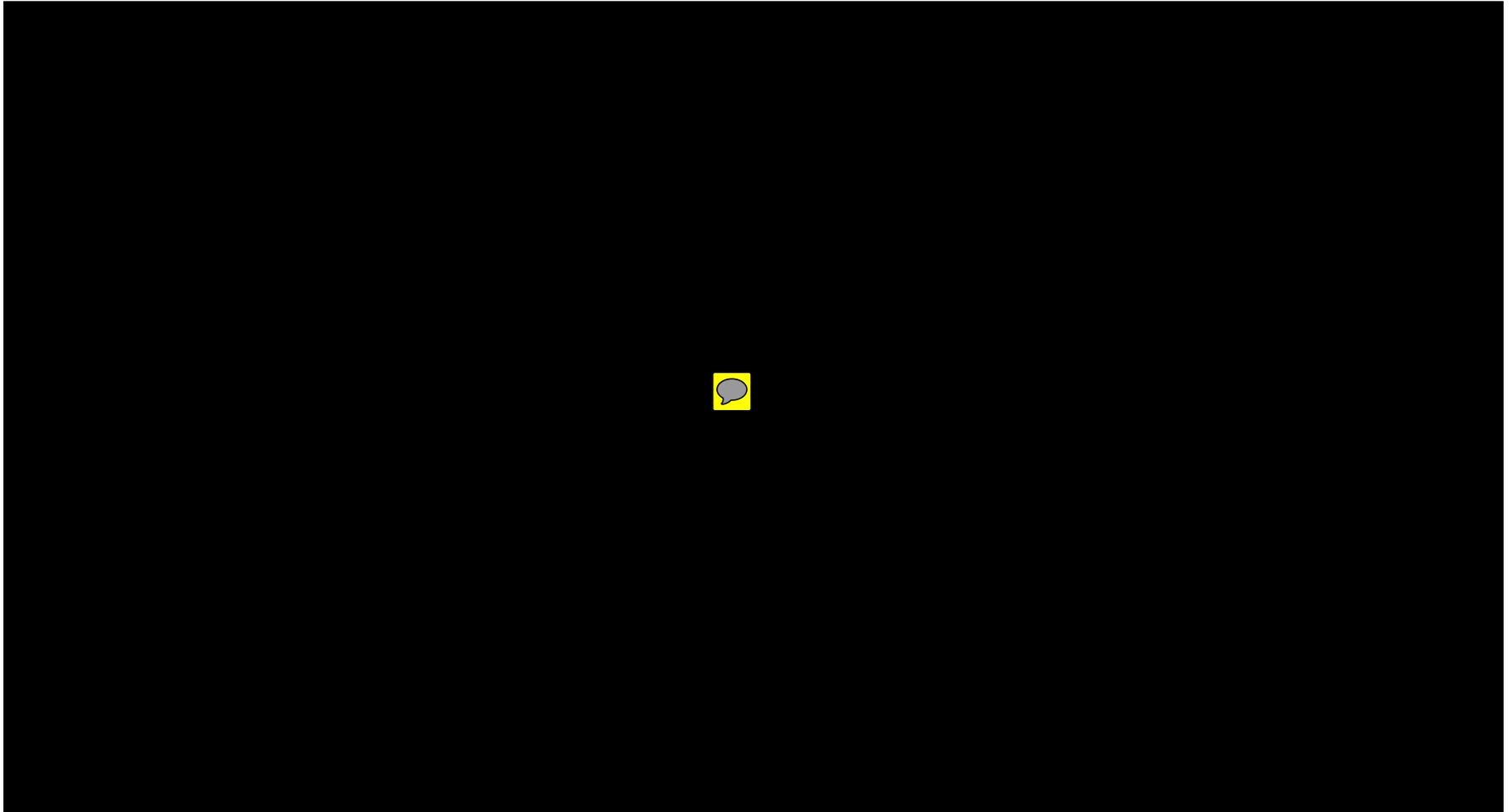
5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Río Escondido



5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Río Salado



5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

B. Concesiones en la cuenca del Río Bravo

CONCESIÓN	OBJETOS	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL	
CON ₁	DR103-1	0.00	1.90	5.71	6.35	8.89	11.43	11.43	8.89	3.17	0.63	2.54	1.90	62.86	
	Extr Ab DR PC SC4	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CON ₂	DR103-2	0.00	2.54	7.62	8.47	11.85	15.24	15.24	11.85	4.23	0.85	3.39	2.54	83.80	
	DR103-3	0.00	3.17	9.52	10.58	14.81	19.05	19.05	14.81	5.29	1.06	4.23	3.17	104.75	
	Extr Ar DR PC SC5 Agrícola, Extr Ab DR PC SC5.a	0.27	0.61	0.92	1.38	1.82	1.17	1.19	1.29	1.20	0.37	0.11	0.06	10.39	
	Extr Ab DR PC SC5.o	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CON ₃	DR 05	0.00	0.00	216.60	162.45	162.45	173.28	162.45	140.79	54.15	0.00	0.00	0.00	1,072.17	
	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	0.17	0.32	0.31	0.62	1.02	1.03	0.81	0.79	0.28	0.14	0.16	0.11	5.75	
	Extr Ab DR PC SC6y10.d	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	
	Extr Ab DR PC SC6y10:Otros, Extr Ab DR PC SC6y10.o	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CON ₄	DR 05 San Pedro	0.00	0.00	30.00	22.50	22.50	24.00	22.50	19.50	7.50	0.00	0.00	0.00	148.50	

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONC ESIÓN	OBJETOS	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
	Extr Ar DR PC SC6y10 Agrícola	0.17	0.32	0.31	0.62	1.02	1.03	0.81	0.79	0.28	0.14	0.16	0.11	5.75
CON₅	Extr FC SC6y10 Rio Florido Agrícola	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
CON₆	Extr Ab DR PC SC6y10 Agrícola	0.50	0.90	0.90	1.76	2.92	2.94	2.32	2.26	0.80	0.39	0.45	0.32	16.47
	Exp SC6y10 Imp SC12	1.72	2.74	4.59	6.00	5.93	5.41	5.20	5.07	4.10	1.51	0.48	0.44	43.20
CON₇	Extr Ab DR PC SC12.a	0.08	0.12	0.32	0.53	0.48	0.41	0.40	0.52	0.38	0.07	0.00	0.00	3.30
	Extr Ab DR PC SC12.o	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
CON₈	DR 090	0.00	13.09	24.31	31.79	26.18	31.79	29.92	24.31	5.61	0.00	0.00	0.00	187.00
	Extr Ar DR PC SC13.a	0.44	0.71	1.00	1.46	1.31	0.94	1.10	0.86	0.61	0.21	0.23	0.21	9.08
	Extr Ar DR PC SC13.d	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	Extr Ar DR PC SC13.O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CON₉	Extr PC SC14 I Agrícola	0.28	0.84	1.02	0.55	0.98	1.19	0.46	0.30	0.22	0.10	0.11	0.30	6.34
	Extr PC SC14 I.d	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	Extr PC SC14 I.o, Extr PC SC14 II Otro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CON₁₀	Extr PC SC15.a	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.18
	Extr PC SC15.o	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONC ESIÓN	OBJETOS	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
CON₁₁	Extr Cd Acuna	0.29	0.29	0.33	0.33	0.34	0.34	0.37	0.40	0.34	0.34	0.29	0.29	3.95
CON₁₂	DR 06 M3	0.29	0.30	1.05	0.73	0.37	0.25	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.09	3.17
	Extr Ab DR PC SC20 Mex	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CON₁₃	DR 050 SC 22	0.84	4.08	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	11.88
	Extr PC SC22 Agrícola	0.02	0.04	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.50
	Extr Piedras Negras	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	8.20
	Extr PC SC22 Domestico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
CON₁₄	DR 050 SC 24	0.64	3.36	4.64	2.72	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	16.00
	Extr PC SC24 Agrícola	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	Extr CFE SC24	0.66	0.70	0.82	0.85	0.79	0.83	0.91	0.98	0.85	0.88	0.71	0.60	9.59
	Extr PC SC22 Domestico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CON₁₅	DR 050 SC 25	0.24	2.16	1.68	3.60	5.04	3.60	2.88	2.88	1.44	0.00	0.00	0.24	23.76
	Extr Ar DR PC SC25 Agrícola	0.07	0.12	0.20	0.21	0.18	0.16	0.14	0.14	0.07	0.06	0.09	0.09	1.52
	Extr SC25 Mex: Nuevo Laredo	2.02	2.00	2.00	2.00	2.01	2.01	2.02	2.02	2.03	2.03	2.04	2.04	24.23
	Extr Ar DR PC SC25 Domestico; Extr SC25 Mex: Ab DR PC SC25 Domestico	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.34

5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONC ESIÓN	OBJETOS	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
CON₁₆	DR 050 SC 29	0.32	2.88	2.24	4.80	6.72	4.80	3.84	3.84	1.92	0.00	0.00	0.32	31.68
	Nueva Cd Guerrero	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.55
CON₁₇	DR 004 Don Martin	45.09	60.12	105.21	90.18	90.18	60.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.09	495.99
	Extr Ab DR PC SC28 I:Agrícola	3.91	3.89	3.74	3.56	3.46	3.26	3.13	3.21	3.36	3.77	4.07	4.13	43.48
	Extr Ab DR PC SC28 I:Otros	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07
CON₁₈	DR 026	161.78	5.99	71.90	185.75	125.83	17.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.96	599.20
CON₁₉	DR 025	224.90	35.51	284.09	378.78	142.04	35.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	82.86	1,183.70
	DR 026 SC36	10.68	0.09	6.76	10.60	1.92	0.08	0.01	0.03	0.02	0.03	0.00	2.20	32.44
	Ciudad Mier, M Alemán, Díaz Ordaz, Reynosa	2.42	2.26	2.46	2.45	2.80	2.77	2.86	2.93	2.71	2.70	2.56	2.46	31.36
	Extr Ab DR PC SC36:Domestico	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	1.39
	Extr Ab DR PC SC36:Otros, Extr Ab DR PC SC36:Perdida por creciente	0.59	0.67	0.72	0.63	1.04	0.74	1.76	2.19	3.29	7.20	3.52	1.72	24.07
CON₂₀	Ciudad Bravo	0.20	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	2.37
	ExtrSC37:Agrícola	0.21	0.12	0.06	0.44	0.46	0.11	0.03	0.08	0.03	0.04	0.00	0.01	1.57

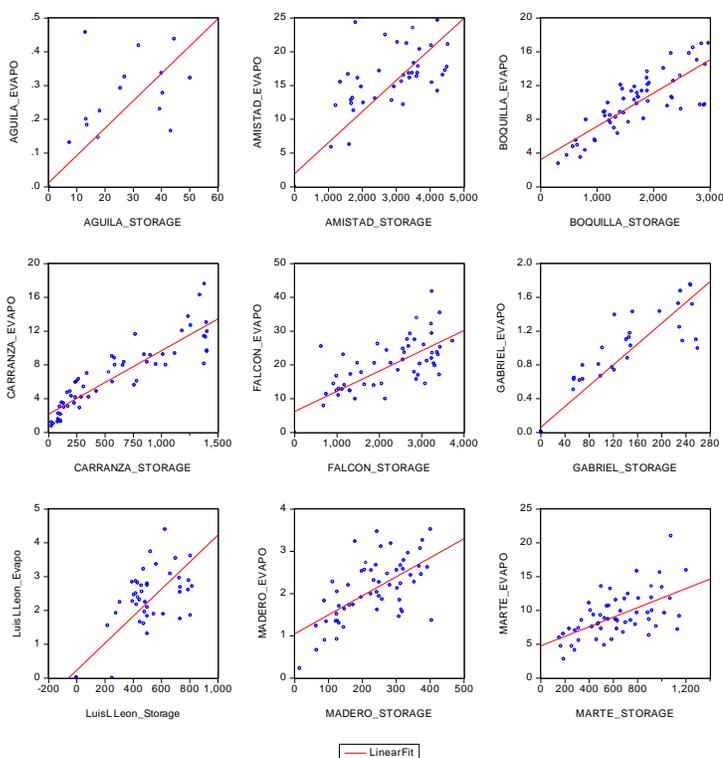
5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

CONCESIÓN	OBJETOS	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
	ExtrSC37:Otros, ExtrSC37:C Retamal	4.75	4.99	5.07	5.10	6.44	6.71	6.26	11.48	29.4 2	45.2 1	21.9 2	6.76	154.11
	TOTAL [MM3]	464. 46	157.93	803.29	948.96	657.00	429.36	298.30	263.43	134. 46	68.8 4	48.1 8	190. 76	4,464. 97

C. Modelos mensuales de evaporación por presa Enero

Tabla Anexo B. 1. Modelos de evaporación por presa para el mes de enero.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$4.75822078976 + 0.00706420123194 * x$	0.35
Falcón	$6.21878208124 + 0.00598976808095 * x$	0.55
V. Carranza	$2.1617486066 + 0.00751836718711 * x$	0.80
Amistad	$1.9601363306 + 0.0046020391171 * x$	0.79
Luis L León	$0.23356413489 + 0.00399644977482 * x$	0.74
Madero	$1.04546698806 + 0.00450496525302 * x$	0.39
Boquilla	$3.23681576195 + 0.00393794030889 * x$	0.65
Pico de Águila	$0.0120815830581 + 0.00809127704935 * x$	0.76
San Gabriel	$0.0615660758406 + 0.00615730682645 * x$	0.89

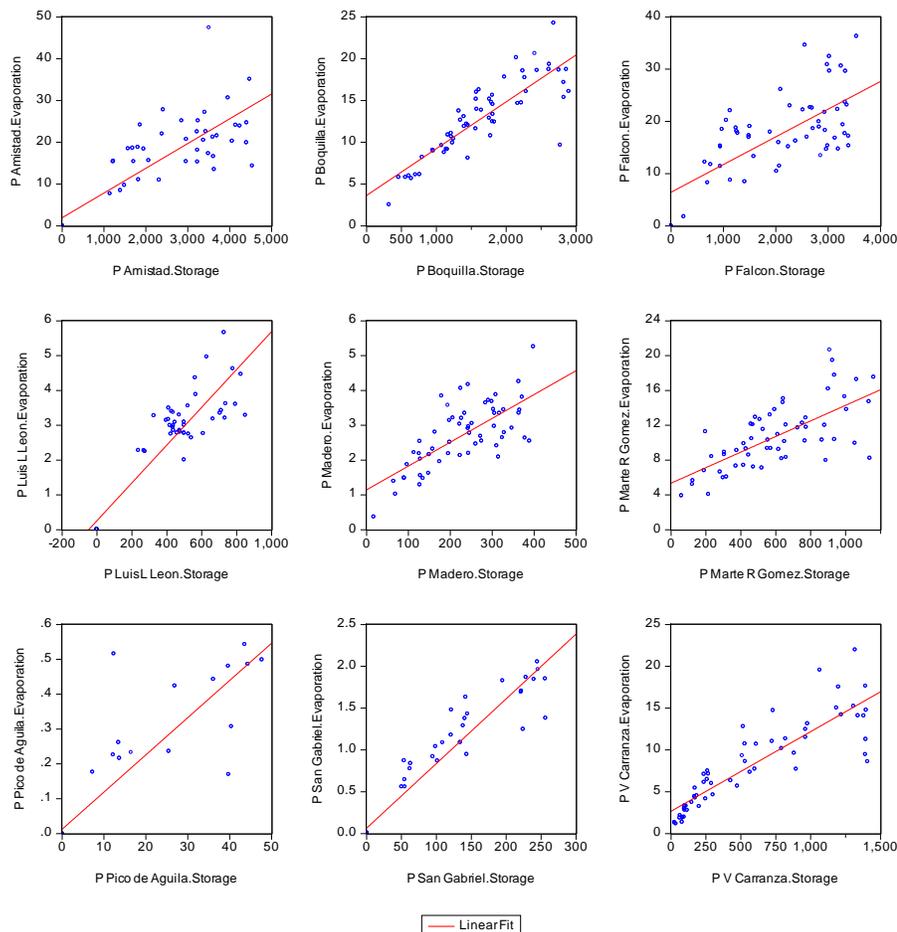


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Febrero

Tabla Anexo B. 2. Modelos de evaporación por presa para el mes de febrero.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$5.33935531967 + 0.00894640549411 * x$	0.47
Falcón	$6.4284881538 + 0.00530434672414 * x$	0.48
V. Carranza	$2.65840612296 + 0.00952582684031 * x$	0.76
Amistad	$1.93503163923 + 0.00592015257504 * x$	0.73
Luis L León	$0.259007319783 + 0.00542851270524 * x$	0.86
Madero	$1.1439530573 + 0.00684467168087 * x$	0.50
Boquilla	$3.63592551145 + 0.00560213760203 * x$	0.73
Pico de Águila	$0.0123164704081 + 0.0106756396352 * x$	0.82
San Gabriel	$0.0633966355395 + 0.00773915616666 * x$	0.93

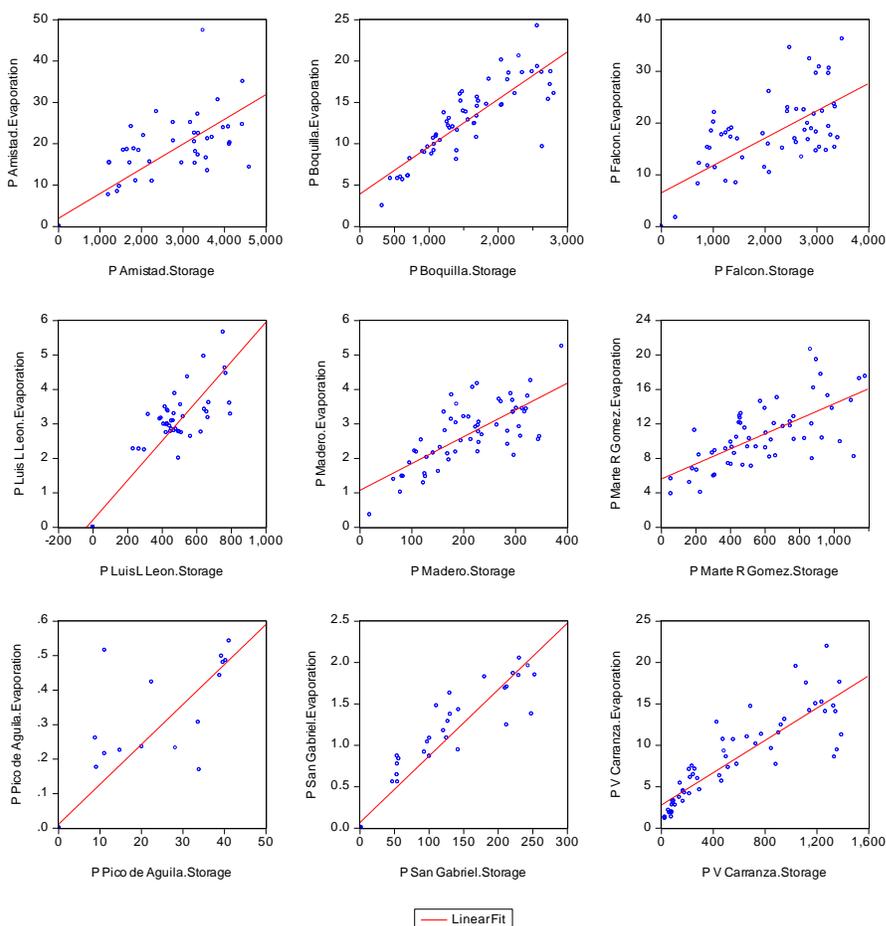


C. MODELOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN POR PRESA

Marzo

Tabla Anexo B. 3. Modelos de evaporación por presa para el mes de marzo.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$5.61159350856 + 0.00872721280106 * x$	0.45
Falcón	$6.51274855603 + 0.00528859412883 * x$	0.47
V. Carranza	$2.79156370854 + 0.00975570064213 * x$	0.75
Amistad	$1.98067558406 + 0.00597898554276 * x$	0.72
Luis L. León	$0.218570611964 + 0.00573106272975 * x$	0.87
Madero	$1.07325009238 + 0.00776816708496 * x$	0.53
Boquilla	$3.92920284245 + 0.00572339802894 * x$	0.71
Pico de Águila	$0.0111522298129 + 0.0115805830192 * x$	0.83
San Gabriel	$0.0676339297525 + 0.00802463939393 * x$	0.92

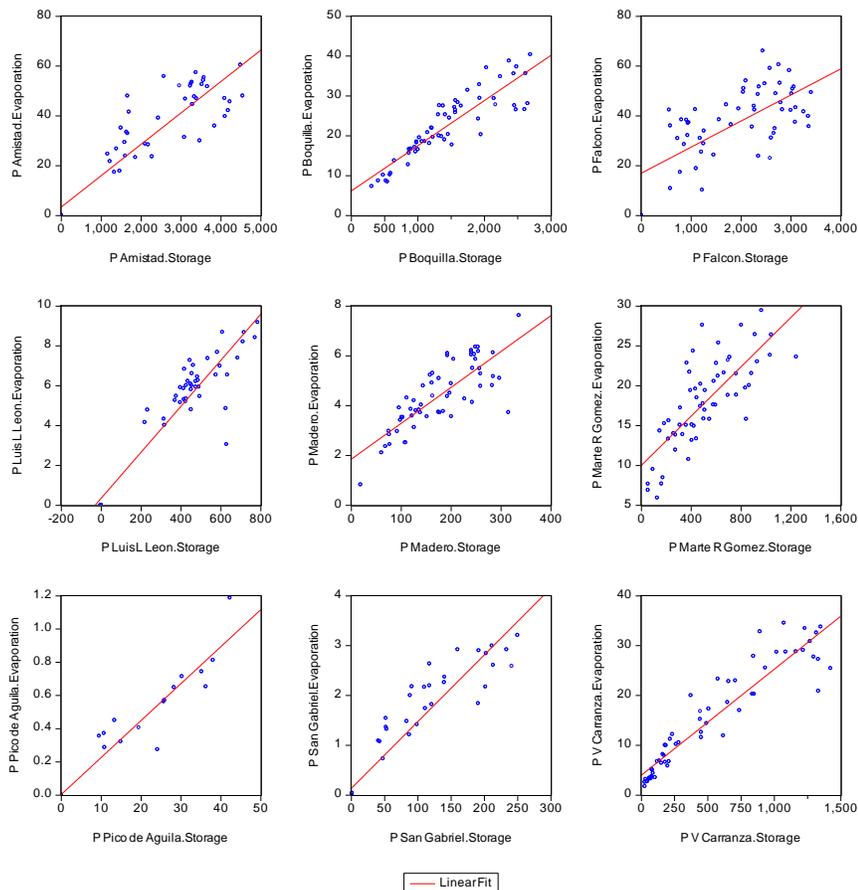


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Abril

Tabla Anexo B. 4. Modelos de evaporación por presa para el mes de abril.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$10.0072880542 + 0.0154746858395 * x$	0.59
Falcón	$17.0091420911 + 0.0104670661384 * x$	0.46
V. Carranza	$4.00529361408 + 0.0212786885836 * x$	0.88
Amistad	$3.38844485112 + 0.0126003712591 * x$	0.85
Luis L. León	$0.353873609229 + 0.01154849833 * x$	0.90
Madero	$1.85244614447 + 0.0144101080931 * x$	0.64
Boquilla	$6.16363868883 + 0.0113382343845 * x$	0.79
Pico de Águila	$0.00370741250657 + 0.0222667737518 * x$	0.95
San Gabriel	$0.134942893349 + 0.0134058287218 * x$	0.90

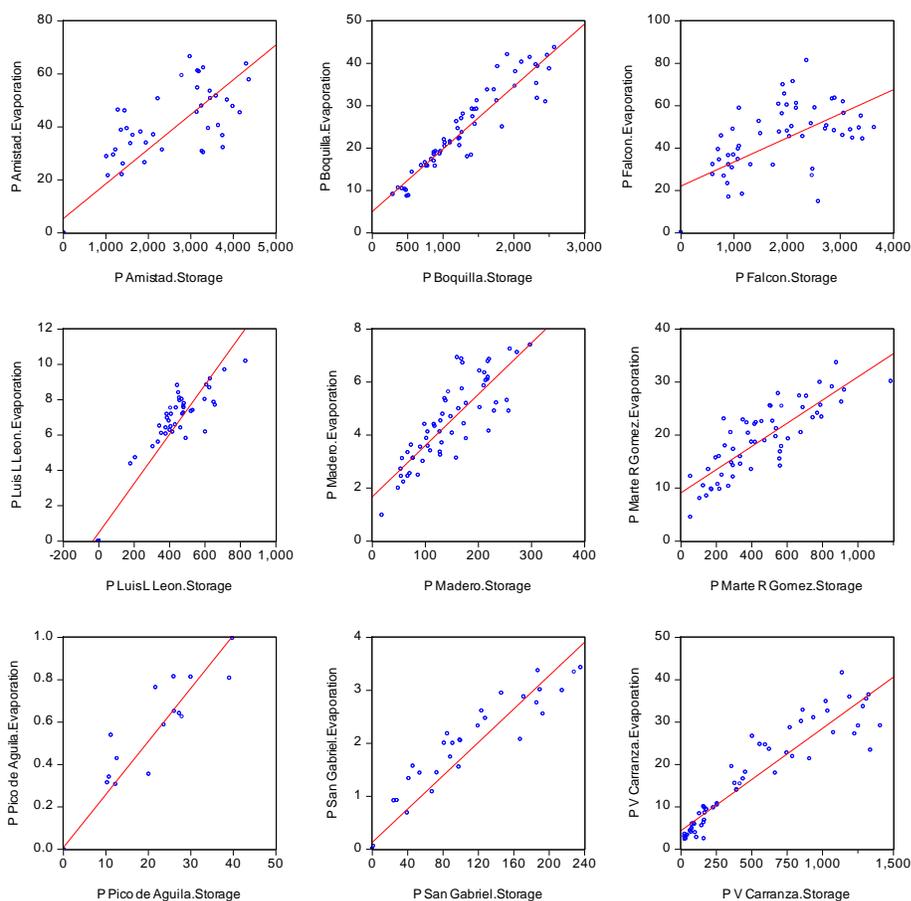


C. MODELOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN POR PRESA

Mayo

Tabla Anexo B. 5. Modelos de evaporación por presa para el mes de mayo.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$9.10017908808 + 0.0218725845208 * x$	0.69
Falcón	$22.0529734098 + 0.0113642214129 * x$	0.38
V. Carranza	$4.36715470024 + 0.0241480065469 * x$	0.87
Amistad	$5.38175908887 + 0.013096041202 * x$	0.78
Luis L. León	$0.469712499654 + 0.0139466024655 * x$	0.93
Madero	$1.66912273579 + 0.0193434015152 * x$	0.70
Boquilla	$5.01158126425 + 0.0147459630912 * x$	0.87
Pico de Águila	$0.00780148552213 + 0.0250523994821 * x$	0.95
San Gabriel	$0.128604980918 + 0.0157366656707 * x$	0.93

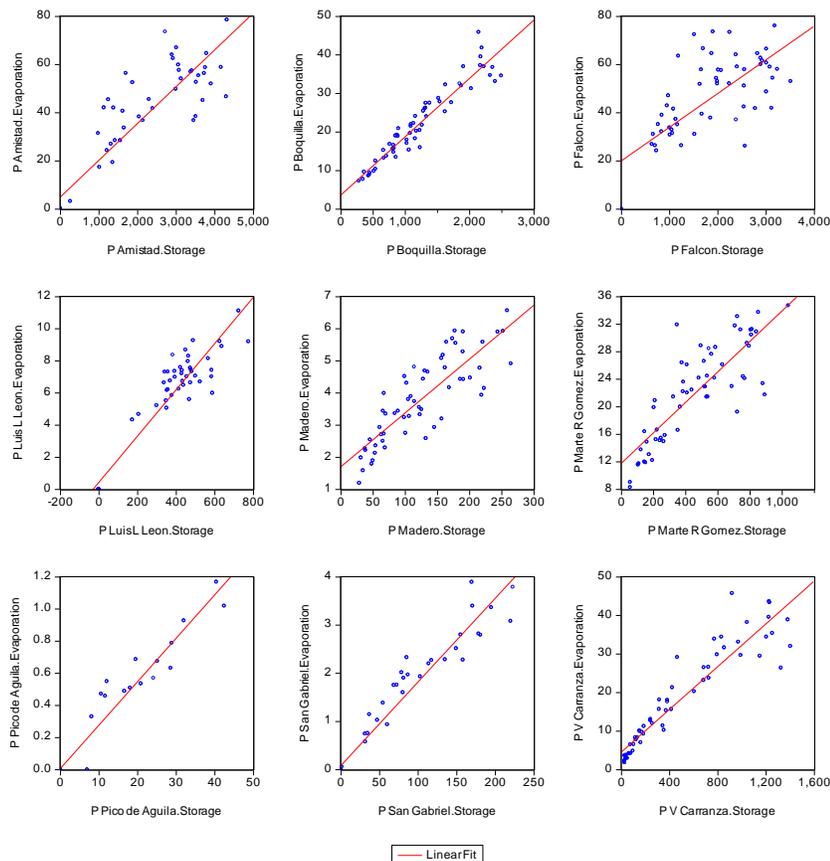


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Junio

Tabla Anexo B. 6. Modelos de evaporación por presa para el mes de junio.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$11.8092461554 + 0.0221412890006 * x$	0.69
Falcón	$20.0722286109 + 0.0139804669786 * x$	0.52
V. Carranza	$4.58724264808 + 0.0277390710606 * x$	0.87
Amistad	$5.02465097175 + 0.0152781880612 * x$	0.82
Luis L. León	$0.447288305729 + 0.0144018674921 * x$	0.91
Madero	$1.70729350783 + 0.01676389687 * x$	0.70
Boquilla	$3.6651393716 + 0.0151345771723 * x$	0.90
Pico de Águila	$0.00720675985854 + 0.0270516576015 * x$	0.96
San Gabriel	$0.0851423247864 + 0.0173739800962 * x$	0.95

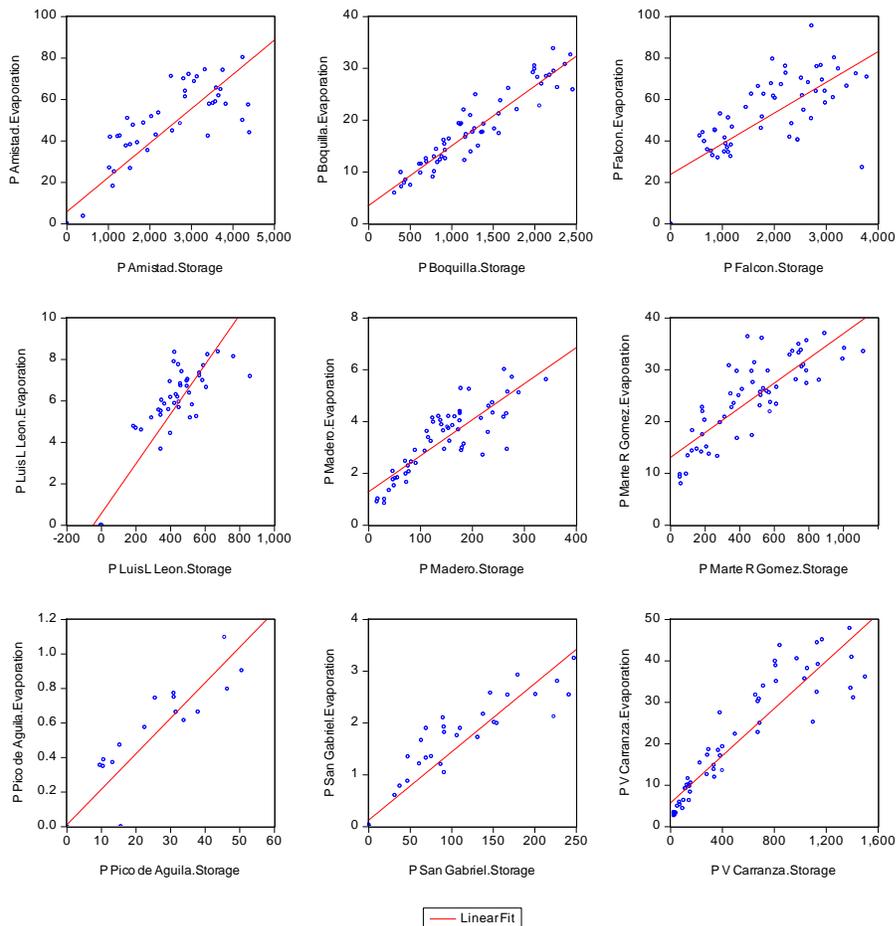


C. MODELOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN POR PRESA

Julio

Tabla Anexo B. 7. Modelos de evaporación por presa para el mes de julio.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$13.0945759532 + 0.0239007756082 * x$	0.67
Falcón	$23.8315950923 + 0.0148039105378 * x$	0.53
V. Carranza	$5.72652701355 + 0.028481070583 * x$	0.84
Amistad	$5.80294300884 + 0.0165630690674 * x$	0.82
Luis L. León	$0.573476626046 + 0.0119758921873 * x$	0.87
Madero	$1.29343369936 + 0.0138996933342 * x$	0.71
Boquilla	$3.5344668557 + 0.0115206131615 * x$	0.88
Pico de Águila	$0.0105586089105 + 0.0205768257567 * x$	0.93
San Gabriel	$0.125887082738 + 0.0131758742011 * x$	0.90

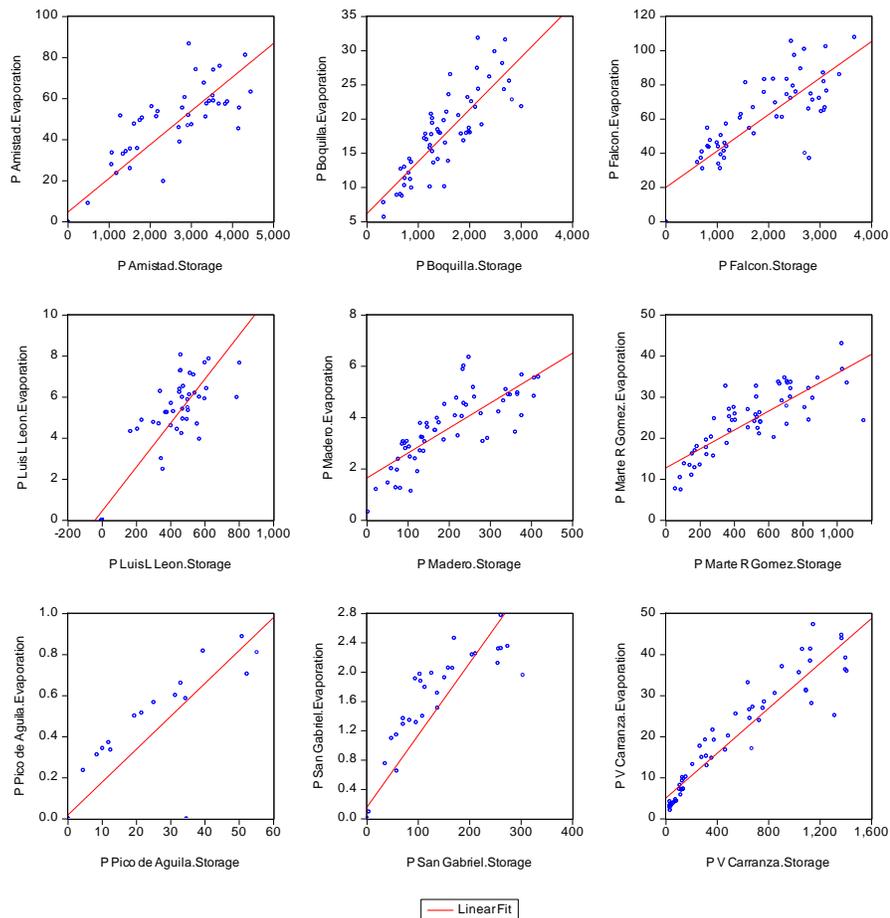


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Agosto

Tabla Anexo B. 8. Modelos de evaporación por presa para el mes de agosto.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$12.7748119434 + 0.0230385747682 * x$	0.65
Falcón	$20.0747371408 + 0.0213155149321 * x$	0.66
V. Carranza	$5.06337721263 + 0.0273264903919 * x$	0.88
Amistad	$4.72056286442 + 0.0164285001343 * x$	0.84
Luis L. León	$0.454765214457 + 0.0107185494467 * x$	0.84
Madero	$1.64929173874 + 0.00972557815109 * x$	0.63
Boquilla	$6.18824384175 + 0.00761748160389 * x$	0.69
Pico de Águila	$0.0187962295681 + 0.0160301130544 * x$	0.85
San Gabriel	$0.159035414754 + 0.00984538467274 * x$	0.87

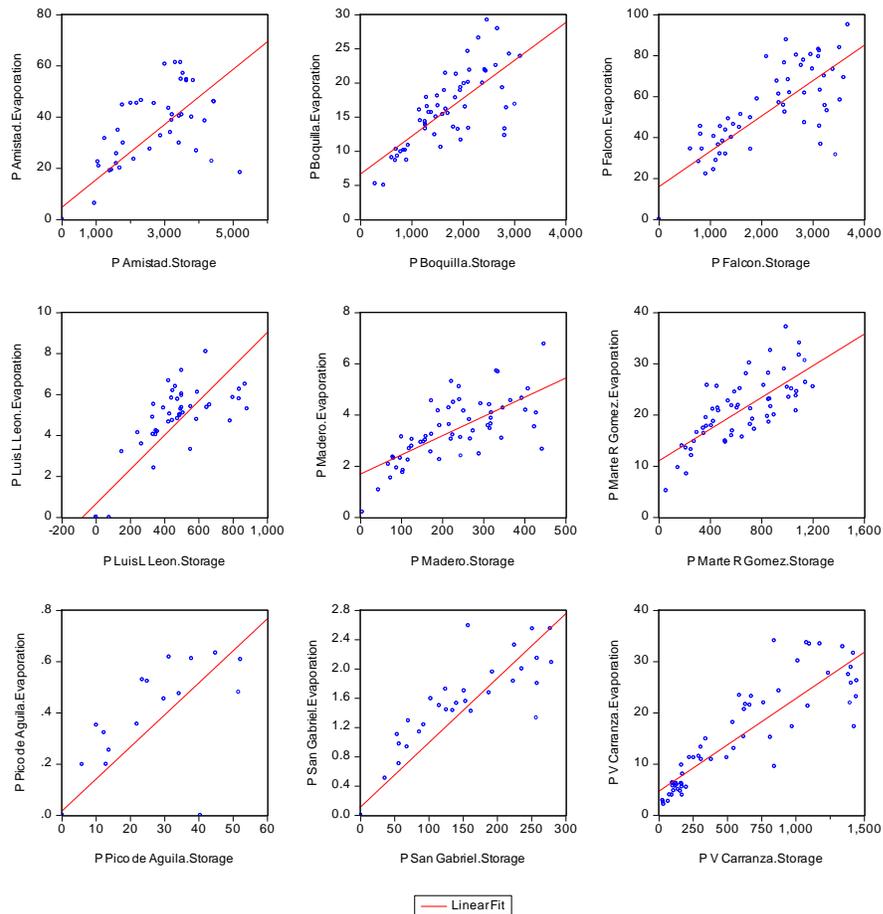


C. MODELOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN POR PRESA

Septiembre

Tabla Anexo B. 9. Modelos de evaporación por presa para el mes de septiembre.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$11.0745304631 + 0.0154672657894 * x$	0.55
Falcón	$16.0511013107 + 0.0172615870791 * x$	0.63
V. Carranza	$4.72664594246 + 0.0180747250993 * x$	0.77
Amistad	$4.83847255768 + 0.0107670397476 * x$	0.68
Luis L. León	$0.679923533477 + 0.00835780119918 * x$	0.79
Madero	$1.69700128892 + 0.00750046603774 * x$	0.49
Boquilla	$6.66772253838 + 0.00555014856543 * x$	0.53
Pico de Águila	$0.0172559232599 + 0.0125000251571 * x$	0.78
San Gabriel	$0.113494855375 + 0.00880747032586 * x$	0.88

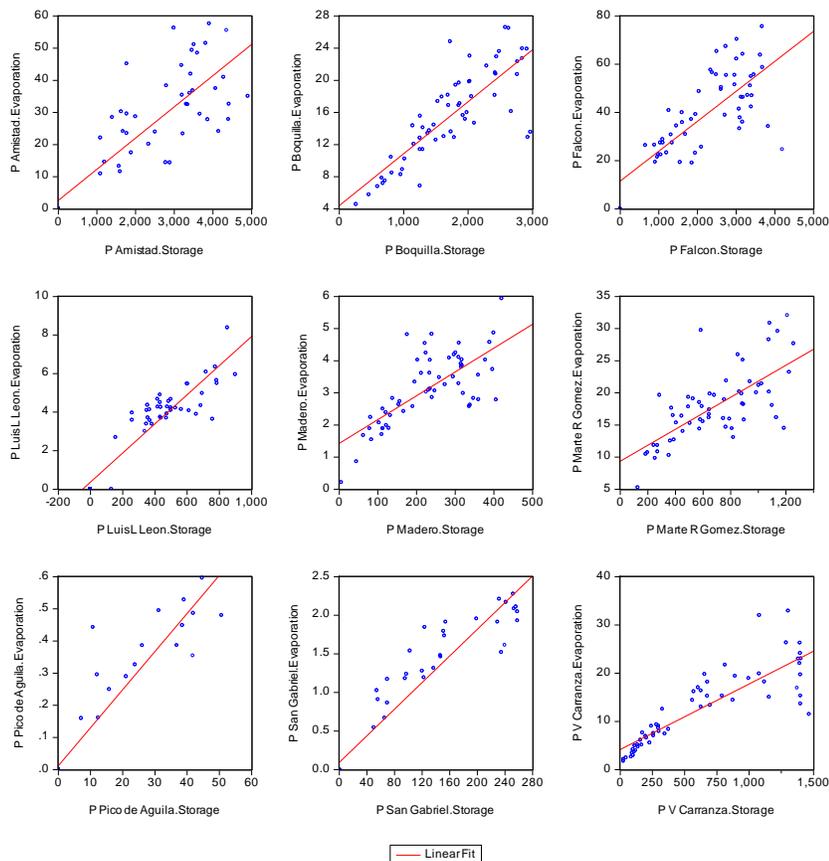


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Octubre

Tabla Anexo B. 10. Modelos de evaporación por presa para el mes de octubre.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$9.35410648982 + 0.0124443480919 * x$	0.47
Falcón	$11.5053833046 + 0.0124209023418 * x$	0.57
V Carranza	$4.15829149266 + 0.0135917960183 * x$	0.73
Amistad	$2.60622721282 + 0.00971193793207 * x$	0.73
Luis L. León	$0.369503161105 + 0.00755342008337 * x$	0.87
Madero	$1.42524069217 + 0.00741567010095 * x$	0.52
Boquilla	$4.39543299101 + 0.00646810991039 * x$	0.66
Pico de Águila	$0.0117606461507 + 0.0118493057507 * x$	0.90
San Gabriel	$0.0924447810893 + 0.00862819144443 * x$	0.92

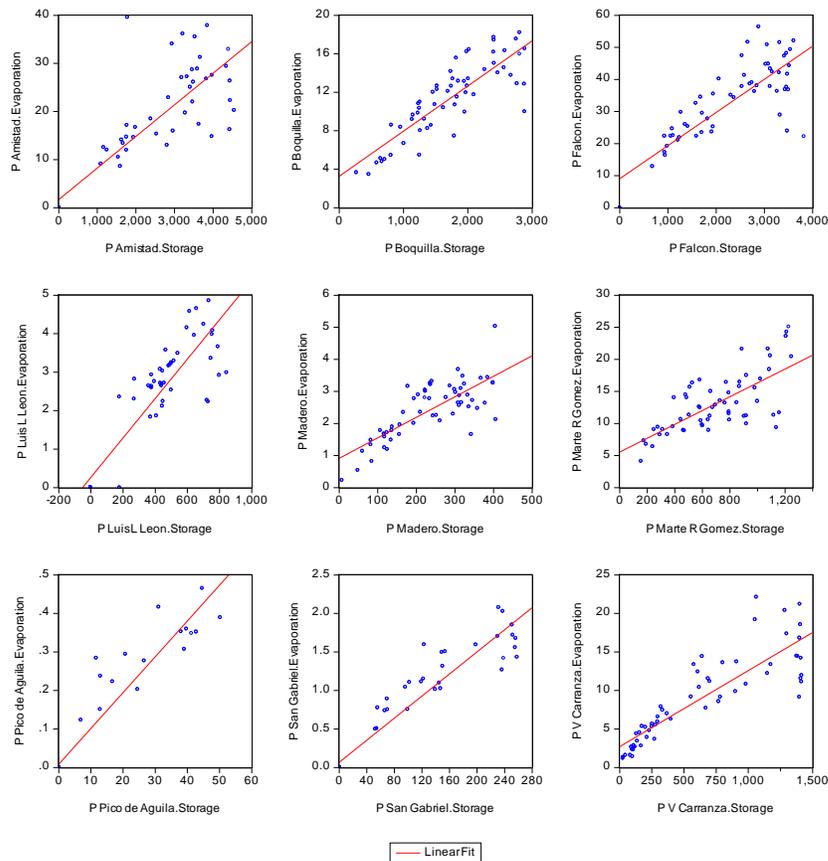


C. MODELOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN POR PRESA

Noviembre

Tabla Anexo B. 11. Modelos de evaporación por presa para el mes de noviembre.

Presa	Ecuación	r^2
Marte R. Gómez	$5.53780627063 + 0.0107874524911 * x$	0.50
Falcón	$9.01432196476 + 0.0103361296059 * x$	0.69
V. Carranza	$2.70277845979 + 0.00988037791965 * x$	0.75
Amistad	$1.68197817976 + 0.00656778873923 * x$	0.75
Luis L. León	$0.266182843221 + 0.00512120480101 * x$	0.81
Madero	$0.912112595944 + 0.00639662500295 * x$	0.59
Boquilla	$3.26570091165 + 0.00469215070168 * x$	0.71
Pico de Águila	$0.0084967846714 + 0.0092967832937 * x$	0.92
San Gabriel	$0.0669093713959 + 0.00716906710394 * x$	0.92

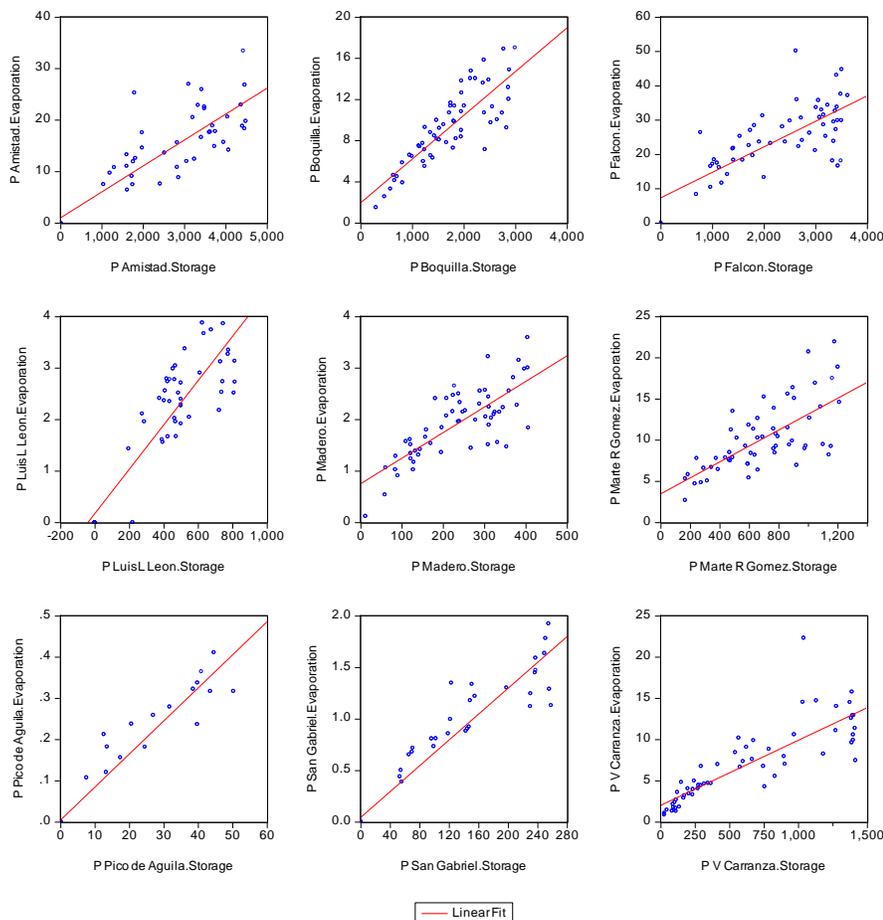


5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGO Y EL PLAN DE GESTIÓN DE RIESGO EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO PARA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA

Diciembre

Tabla Anexo B. 12. Modelos de evaporación por presa para el mes de diciembre.

Presa	Ecuación	r ²
Marte R. Gómez	$3.50091263189 + 0.00967263708266 * x$	0.48
Falcón	$7.38230534247 + 0.00742982372495 * x$	0.57
V. Carranza	$2.04024560695 + 0.00789552006966 * x$	0.71
Amistad	$1.03824118128 + 0.00503723148839 * x$	0.79
Luis L. León	$0.182230487636 + 0.00430134345154 * x$	0.83
Madero	$0.756271858358 + 0.00497149724671 * x$	0.59
Boquilla	$1.97873017849 + 0.00425186756824 * x$	0.69
Pico de Águila	$0.00523057802693 + 0.00801835611615 * x$	0.95
San Gabriel	$0.0460297343071 + 0.00627133306383 * x$	0.93



Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- AghaKouchak, A. (2015). A Multivariate Approach for Persistence-Based Drought Prediction: Application to the 2010–2011 East Africa Drought. *Journal of Hydrology*, 526, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.063>
- Andreadis, K. M., Clark, E. A., Wood, A. W., Hamlet, A. F. y Lettenmaier, D. P. (2005). Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 985–1001.
- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N. y Hrissanthou, V. (2012). Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions. *Water Resources Management*, 26(9), 2453–2473. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>
- Assimacopoulos, D., Kampragkou, E., Andreu, J., Bifulco, C., De Carli, A., De Stefano, L., Dias, S., Gudmundsson, L., Haro-Monteaagudo, D., Musolino, D., Paredes-Arquiola, J., Rego, F. C., Solera, A., Urquijo, J., Van Lanen, H. A. J. y Wolters, W. (2014). *Future Drought Impact and Vulnerability: Case study scale* (DROUGHT-R&SPI Technical Report No. 20).
- Bachmair, S., Svensson, C., Prosdocimi, I., Hannaford, J. y Stahl, K. (2017). Developing Drought Impact Functions for Drought Risk Management. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (May), 1–22. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-187>
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M. V. y Cadena-Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 201–218. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222011000300013&script=sci_arttext&tlng=en
- Baudoin, M.-A., Vogel, C., Nortje, K. y Naik, M. (2017). Living with Drought in South Africa: Lessons Learnt from the Recent El Niño Drought Period. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23(February), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.05.005>
- Bernhardt, C. E., Horton, B. P. y Stanley, J.-D. (2012). Nile Delta Vegetation Response to Holocene Climate Variability. *Geology*, 40(7), 615–618. <https://doi.org/10.1130/G33012.1>
- Blauhut, V., Stahl, K., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., De Stefano, L. y Vogt, J. (2016). Estimating Drought Risk across Europe from Reported Drought Impacts, Drought Indices, and Vulnerability Factors. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2779–2800. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2779-2016>
- Blom, G. (1958). *Statistical Estimates and Transformed Beta-Variables*. New York, US: John Wiley & Sons.
- Bohle, H. G., Downing, T. E. y Watts, M. J. (1994). Climate Change and Social Vulnerability: Toward a sociology and geography of food insecurity. *Global*

- environmental change*, 4(1), 37–48. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378094900205>
- Botterill, L. C. y Hayes, M. J. (2012). Drought triggers and declarations: Science and policy considerations for drought risk management. *Natural Hazards*, 64(1), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0231-4>
- Brooks, N., Neil Adger, W. y Mick Kelly, P. (2005). The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation. *Global Environmental Change*, 15(2), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006>
- Carrão, H. y Barbosa, P. (2015). *Models of Drought Hazard, Exposure, Vulnerability and Risk for Latin America* (Technical Report). EC-JRC; IES.
- Carrão, H., Naumann, G. y Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change*, 39, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012>
- Carrão, H., Singleton, A., Naumann, G., Barbosa, P. y Vogt, J. V. (2014). An Optimized System for the Classification of Meteorological Drought Intensity with Applications in Drought Frequency Analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(8), 1943–1960. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0167.1>
- Cherchye, L., Moesen, W., Rogge, N., Van Puyenbroeck, T., Saisana, M., Saltelli, A., Liska, R. y Tarantola, S. (2008). Creating composite indicators with DEA and robustness analysis: the case of the Technology Achievement Index. *Journal of the Operational Research Society*, 59(2), 239–251. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602445>
- Cherchye, Laurens, Moesen, W., Rogge, N. y Puyenbroeck, T. V. (2007). An Introduction to ‘Benefit of the Doubt’ Composite Indicators. *Social Indicators Research*, 82(1), 111–145. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-9029-7>
- CONAGUA. (2009a). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Durango*. Coyoacán, México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2009b). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco*. Coyoacán, México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2009c). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. Coyoacán, México: SEMARNAT.
- CONAGUA. Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos, DOF: 02/06/2011 § (2011).
- CONAGUA. (2013). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. SEMARNAT.
- CONAGUA. (2014). *Programa Nacional contra la Sequía: Documento rector*.
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CRED. (2015). *The human cost of weather related disasters: 1995-2015*. The UN Office for Disaster Risk Reduction. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Cunnane, C. (1978). Unbiased plotting positions - A review. *Journal of Hydrology*, 37, 205–222. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90120-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90120-3)

- Damm, M. (2009). *Mapping Social-Ecological Vulnerability to Flooding: A Sub-National Approach for Germany*. Universitäts-und Landesbibliothek Bonn.
- Ding, Y., Hayes, M. J. y Widhalm, M. (2011). Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 20(4), 434–446. <https://doi.org/10.1108/09653561111161752>
- Downing, T. E. y Bakker, K. (2000). Drought Risk in a Changing Environment. En J. V. Vogt & F. Somma (Eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe* (Vol. 14). Springer Netherlands.
- Dracup, J. A., Lee, K. S. y Paulson Jr., E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297–302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>
- European Commission. (2007). *Drought Management Plan Report* (Technical Report No. 2008–023). Luxembourg.
- Farahmand, A. y AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 76, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.012>
- Gobierno del Distrito Federal y SACMEX. (2012). *Programa de gestión integral de los recursos hídricos: Visión 20 años*.
- Gobierno del Estado de Chihuahua y JCAS. (2011). *Programa Sectorial 2011-2016: El agua en Chihuahua*.
- González Tánago, I., Urquijo, J., Blauhut, V., Villarroya, F. y De Stefano, L. (2016). Learning from Experience: A Systematic Review of Assessments of Vulnerability to Drought. *Natural Hazards*, 80(2), 951–973. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2006-1>
- Gringorten, I. I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research*, 68(3), 813–813. <https://doi.org/10.1029/JZ068i003p00813>
- GWP-CEE. (2015). *Guidelines for the preparation of Drought Management Plans. Development and implementation in the context of the EU Water Framework Directive*. Bratislava: Global Water Partnership Central and Eastern Europe.
- Halwatura, D., Lechner, A. M. y Arnold, S. (2015). Drought severity-duration-frequency curves: A foundation for risk assessment and planning tool for ecosystem establishment in post-mining landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 1069–1091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1069-2015>
- Hao, Z. y AghaKouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>
- Hao, Z. y AghaKouchak, A. (2014). A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 89–101. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0160.1>
- Hashimoto, T., Loucks, D. P. y Stedinger, J. R. (1982). Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. *Water Resources Research*, 18(1). Recuperado a partir de <http://pure.iiasa.ac.at/1870>
- Hazen, A. (1913). Storage to be provided impounding reservoirs for municipal water supply. En *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (pp. 1943–2044).

- Helsel, D. R. y Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.2307/1269385>
- Hladný, J. y Buchtele, J. (1989). Hydrological aspects of extremes floods and droughts (pp. 8–27). Presentado en Hydrology of Disasters: Proceedings of the World Meteorological Organization Technical Conference, Geneva: Earthscan from Routledge.
- IMTA. (2015). *Reporte del Cálculo de Índices de Vulnerabilidad ante la Sequía en el Organismo de Cuenca Península de Baja California*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Innocenti, D. (2014). When Science Meets Policy: Enhancing Governance and Management of Disaster Risks. En P. Quevauviller (Ed.), *Hydrometeorological Hazards* (pp. 91–107). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118629567.ch2a>
- Institute of Hydrology. (1980). *Low Flow Studies Report: Catchment characteristic estimation manual* (Vol. 3). Wallingford, UK: Institute of Hydrology.
- IPCC. (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (J. J. McCarthy, Ed.). Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (C. B. Field & V. R. Barros, Eds.). New York, NY: Cambridge University Press.
- Kao, S. C. y Govindaraju, R. S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380(1–2), 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.029>
- Kim, T.-W., Valdés, J. B. y Yoo, C. (2003). Nonparametric Approach for Estimating Return Periods of Droughts in Arid Regions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(5), 237–246.
- Kumar, R., Musuuza, J. L., van Loon, A. F., Teuling, A. J., Barthel, R., Ten Broek, J., Mai, J., Samaniego, L. y Attinger, S. (2016). Multiscale Evaluation of the Standardized Precipitation Index as a Groundwater Drought Indicator. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(3), 1117–1131. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1117-2016>
- Kumar, S. V., Peters-Lidard, C. D., Tian, Y., Houser, P. R., Geiger, J., Olden, S., Lighty, L., Eastman, J. L., Doty, B., Dirmeyer, P. A., Adams, J., Mitchell, K. E., Wood, E. F. y Sheffield, J. (2006). Land information system: An interoperable framework for high resolution land surface modeling. *Environmental Modelling and Software*, 21(10), 1402–1415. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.004>
- Liu, X., Wang, Y., Peng, J., Braimoh, A. K. y Yin, H. (2013). Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive capacity: A case study in middle Inner Mongolia of China. *Chinese Geographical Science*, 23(1), 13–25. <https://doi.org/10.1007/s11769-012-0583-4>

- Lloyd-Hughes, B. (2014). The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3–4), 607–611. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>
- Logar, I. y van den Bergh, J. (2011). *Methods for assessment of the costs of droughts* (No. WP05). Institute of Environmental Science and Technology.
- Logar, I. y van den Bergh, J. C. J. M. (2013). Methods to Assess Costs of Drought Damages and Policies for Drought Mitigation and Adaptation: Review and Recommendations. *Water Resources Management*, 27(6), 1707–1720. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0119-9>
- McKee, T. B., Doesken, N. J. y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society.
- Meyer, V., Priest, S. y Kuhlicke, C. (2012). Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Natural Hazards*, 62(2), 301–324. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9997-z>
- Meyer, V., Schwarze, R., Becker, N., Markantonis, V., Bergh, J. C. J. M. van den, Bouwer, L. M., ... Viavattene, C. (2014). Assessing the Costs of Natural Hazards – State of the Art and the Way Forward. En P. Quevauviller (Ed.), *Hydrometeorological Hazards* (pp. 253–290). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118629567.ch4a>
- Miranda Alonso, S., Benítez Pensado, V. y Flores Zamudio, R. H. (2006). Una herramienta para el manejo de los datos climatológicos del país. En *V Congreso Internacional y XI Nacional de Ciencias Ambientales*. Asociación Nacional de Ciencias Ambientales.
- Mishra, A. K. y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A. y Tarantola, S. (2005). *Tools for Composite Indicators Building* (No. EUR 21682 EN). Ispra, Italy: Joint Research Centre - European Commission. Recuperado a partir de <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC31473/EUR%2021682%20EN.pdf>
- Naumann, G., Barbosa, P., Garrote, L., Iglesias, A. y Vogt, J. V. (2014). Exploring drought vulnerability in Africa: an indicator based analysis to be used in early warning systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1591–1604. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1591-2014>
- Naumann, G., Spinoni, J., Vogt, J. V. y Barbosa, P. (2015). Assessment of drought damages and their uncertainties in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124013>
- Nicolasi, V., Cancelliere, A. y Rossi, G. (2007). Drought risk analysis in water supply systems using genetics algorithms and montecarlo simulation. Presentado en EWRA symposium: New approaches and technologies, Chania Crete, Greece.
- Niemeyer, S. (2008). New drought indices. En A. López-Francos (Ed.), *Drought management: Scientific and technological innovations* (Vol. 80, pp. 267–274). Zaragoza: CIHEAM. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

REFERENCIAS

- OECD, EU y JRC. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Paris: OECD Publishing.
- Orden Ministerial. Orden MAM/698/2007, de 21 de marzo, por la que se aprueban los planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en los ámbitos de los planes hidrológicos de cuencas intercomunitarias, Pub. L. No. MAM/698/2007 (2007).
- Palmer, W. C. (1968). Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21(4), 156–161.
<https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>
- Poder Ejecutivo del Estado de Morelos. Decreto por el que se expide el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Morelos “PEACCMOR”, PO: 5268 § (2015). Recuperado a partir de
http://marcojuridico.morelos.gob.mx/archivos/decretos_ejecutivo/pdf/DPEACCMOR.pdf
- Poder Legislativo del Estado de Tamaulipas. Ley de Aguas del Estado de Tamaulipas, PO: 21-12-2016 § (2016). Recuperado a partir de
<https://www.congresotamaulipas.gob.mx/LegislacionEstatal/LegislacionVigente/VerLey.asp?IdLey=4>
- Poder Legislativo del Estado de Zacatecas. Ley del Cambio Climático para el Estado de Zacatecas y Municipios, POG: 23-09-2015 § (2015). Recuperado a partir de
<http://www.congresozac.gob.mx/coz2/imprime.php?cual=201>
- Poljanšek, K., Marín Ferrer, M., de Groeve, T. y Clark, I. (2017). *Science for disaster risk management 2017 knowing better and losing less*. S. 1.: European Commission. Recuperado a partir de
http://drmkc.jrc.ec.europa.eu/portals/0/Knowledge/ScienceforDRM/Science%20for%20DRM%202017_version%2017%20May%202017.pdf
- Presidencia de la República. Acuerdo por el que se crea la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones, DOF: 05-04-2013 § (2013). Recuperado a partir de
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100458/Acuerdo_Creaci_n_CI_ASI_DOF_05_Abr_2013.pdf
- Presidencia de la República. Ley de Aguas Nacionales, DOF: 24-03-2016 § (2016).
- Richardson, B. G. (2009). *Las grandes sequías mayas: Agua, vida y muerte*. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J. T., Liu, E., ... Woollen, J. (2011). MERRA: NASA’s modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624–3648.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K. E., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B. A., Radakovich, J., Bosilovich, M. G., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D. y Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>

- Ropelewski, C. F., Janowiak, J. E. y Halpert, M. S. (1984). *The Climate Anomaly Monitoring System (CAMS)* (p. 39). Washington DC: Climate Analysis Center.
- Sayers, P. B., Moncrieff, C., Tickner, D., Speed, R., Gang, L., Yu, W., Yuanyuan, L., Jianqiang, L., Xiangyu, X., Aihua, L. y Pegram, G. (2016). *Drought risk management: A strategic approach*. Paris: UNESCO.
- Sayers, P. B., Yuanyuan, L., Moncrieff, C., Jianqiang, L., Tickner, D., Gang, L. y Speed, R. (2017). Strategic drought risk management: eight “golden rules” to guide a sound approach. *International Journal of River Basin Management*, 0(0), 1–17. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1280812>
- SEMARNAT. Manual de integración, estructura orgánica y funcionamiento de la Comisión Nacional del Agua, DOF: 22-04-2015 § (2015).
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrão, H. y Vogt, J. V. (2012). Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(11), 3519–3531. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>
- Shahid, S. y Behrawan, H. (2008). Drought risk assessment in the western part of Bangladesh. *Natural Hazards*, 46(3), 391–413. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9191-5>
- Shukla, S. y Wood, A. W. (2008). Use of a Standardized Runoff Index for Characterizing Hydrologic Drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Smit, B. y Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>
- Solís-Alvarado, Y., Sanvicente-Sánchez, H., García-Hernández, J., Martínez-Castillo, G. y Mendoza-Betanzos, R. (2015). Location and search via the web of hydrometric information of the Mexican National Hydrometric Network. En *WIT Transactions on Ecology and the Environment* (Vol. 200, pp. 79–87). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/WS150071>
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., de Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Kampragou, E., van Loon, A. F., Barker, L. J., Melsen, L. A., Bifulco, C., Musolino, D., de Carli, A., Massarutto, A., Assimacopoulos, D. y van Lanen, H. A. J. (2016). Impacts of European drought events: Insights from an international database of text-based reports. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 801–819. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>
- Svoboda, M. D., LeComte, D., Hayes, M. J., Heim Jr., R. R., Gleason, K., Angel, J. R., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D. y Stephens, S. (2002). Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, (April), 1181–1190. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<1181:TDM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1181:TDM>2.3.CO;2)
- Tsakiris, G. (2007). Practical Application of Risk and Hazard Concepts in Proactive Planning. *European Water*, 19(20), 47–56.
- Tsakiris, G. (2009). A Paradigm for Applying Risk and Hazard Concepts in Proactive Planning. En Ana Iglesias, A. Cancelliere, D. A. Wilhite, L. Garrote, & F. Cubillo

- (Eds.), *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean* (pp. 81–91). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9045-5_7
- Tsakiris, G. (2017). Drought Risk Assessment and Management. *Water Resources Management*, (January), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1698-2>
- Tsakiris, G., Loukas, A., Pangalou, D., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G. y Cancelliere, A. (2007). Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]. En A. Iglesias, M. Moneo, & A. López-Francos (Eds.), *Drought management guidelines technical annex* (Vol. 58, pp. 85–102). Zaragoza: CIHEAM / EC MEDA Water. Recuperado a partir de <http://om.ciheam.org/om/pdf/b58/00800535.pdf>
- Turnbull, B. W. (1976). The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 38(3), 290–295. Recuperado a partir de <http://www.jstor.org/stable/2984980>
- UNDRO. (1991). *Mitigating natural disasters : Phenomena, effects and options : A manual for policy makers and planners*. New York, US. Recuperado a partir de <http://cidbimena.desastres.hn/pdf/eng/doc1028/doc1028.htm>
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Génova. Recuperado a partir de http://unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- UNISDR. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. *Resolución aprobada por la Asamblea General el 3 de junio de 2015*, 26–26. Recuperado a partir de http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf
- van der Pol, T. D., van Ierland, E. C. y Gabbert, S. (2017). Economic analysis of adaptive strategies for flood risk management under climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(2), 267–285. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9637-0>
- Vose, R. S., Schmoyer, R. L., Steurer, P. M., Peterson, T. C., Heim, R., Karl, T. R. y Eischeid, J. K. (1992). *The Global Historical Climatology Network: Long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data*. Oak Ridge National Lab., TN (United States). Carbon Dioxide Information Analysis Center.
- Weibull, E. H. W. (1939). The Phenomenon of Rupture in Solids. *Proceedings of Royal Swedish Institute of Engineering Research*, 153, 1–55.
- Weiss, B. (1982). Egypt remained a strong power well into the second half of the thirteenth century B . C . *Climate Change*, 4, 173–198.
- Wilhelmi, O. V. y Wilhite, D. A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study. *Natural Hazards*, 25(1), 37–58. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1013388814894>
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. En *Drought: A global assessment* (pp. 3–18). London: Routledge Publishers.

REFERENCIAS

- Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Wiréhn, L., Danielsson, Å. y Neset, T.-S. S. (2015). Assessment of Composite Index Methods for Agricultural Vulnerability to Climate Change. *Journal of Environmental Management*, 156, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.020>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. y Davis, I. (2003). *At risk: Natural hazards, peoples' vulnerability and disasters* (Second Ed.).
- WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index user guide*. World Meteorological Organization.
- WMO y GWP. (2014). *National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action (D.A. Wilhite)*. Geneva, Switzerland and Stockholm, Sweden: WMO and GWP.
- WMO y GWP. (2016). *Handbook of drought indicators and indices*. Geneva: World Meteorological Organization and Global Water Partnership.
- Wood, N. (2011). *Understanding Risk and Resilience to Natural Hazards* (U.S. Geological Survey Fact Sheet) (p. 2). Recuperado a partir de <http://pubs.usgs.gov/fs/2011/3008/>
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A. y Wen, F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1), 65–79. <https://doi.org/10.1002/joc.1371>
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers* 23, (23), 25–25. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90110-3)
- Yue, S., Ouarda, T. B. M. J., Bobée, B., Legendre, P. y Bruneau, P. (1999). The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 226(1–2), 88–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00168-7)
- Zanuttigh, B. (2014). Features Common to Different Hydrometeorological Events and Knowledge Integration. En *Hydrometeorological Hazards* (pp. 49–81). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118629567.ch1c>
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. y Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>