



Artículo: COMEII-16003

II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

DIMENSIONAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD PARA AFRONTAR LA SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO

Israel Velasco

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Retirado), Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62330 México. Ivelascovelasco@hotmail.com.

Resumen

La región del río Bravo en el norte de México tiene el problema del agua por su escasez y sobreexplotación para todos los usos, haciéndola especialmente vulnerable a las variaciones naturales. La severidad de la sequía está en función de la oferta/demanda de agua para las actividades humanas y la vegetación; cuando el riesgo se materializa, se produce el desastre. Dimensionar los factores que explican el riesgo, ayuda a formular programas y acciones de mitigación. El riesgo es producto de la interacción de tres factores principales: vulnerabilidad, exposición y severidad, y sólo este último es de carácter natural; los otros son antropogénicos. Sin embargo, la vulnerabilidad es un término subjetivo, porque para la misma situación, significa diferentes cosas para diferentes usuarios. Este es un detalle a resolver al formular un plan para hacer frente a la sequía. La interacción de estos factores conduce a la desagregación de los componentes de la vulnerabilidad: nivel de exposición, adaptabilidad, y sensibilidad; evaluar la vulnerabilidad puede ser desde un enfoque aditivo o multiplicativo. Este trabajo se centra en el enfoque aditivo e incluye 11 factores principales, que están relacionados con aspectos sociales, económicos y ambientales; su tratamiento conjunto puede conducir a la consideración global del problema. Puesto que la unidad geográfica de análisis de agua es la cuenca, este es también el nivel de estimación de la vulnerabilidad. La metodología se basa en definir la zona de estudio y los factores que interactúan, asumiendo información de calidad; los pasos básicos son el cálculo, análisis y procesamiento de la información; la última fase es determinar los pesos de cada uno de los factores utilizando el software *Superdecisions*®, cuidando ciertas restricciones y condiciones de la teoría de matrices. Después es necesario hacer un proceso de calibración, y uno de los resultados es un mapa de cada tipo de vulnerabilidad -ambiental, económica, social y global-, que es una forma práctica y objetiva, básica para la planificación de la mitigación del impacto de la sequía.

Palabras clave adicionales: Sequía, vulnerabilidad, evaluación de vulnerabilidad, riesgo y escasez de agua.

Introducción

La sequía es un fenómeno climático temporal recurrente, caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal para una zona determinada; no presenta epicentro ni trayectorias definidas sino que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, provocando que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas. La sequía es considerada como uno de los fenómenos naturales más complejos y que afecta a más personas en el mundo. A diferencia de otros desastres asociados a fenómenos naturales cuyos impactos son locales y de corto plazo, las sequías abarcan grandes áreas geográficas y sus consecuencias pueden prevalecer por varios años, con un efecto negativo en la calidad de vida y en el desarrollo de las poblaciones afectadas (CENAPRED, 2007).

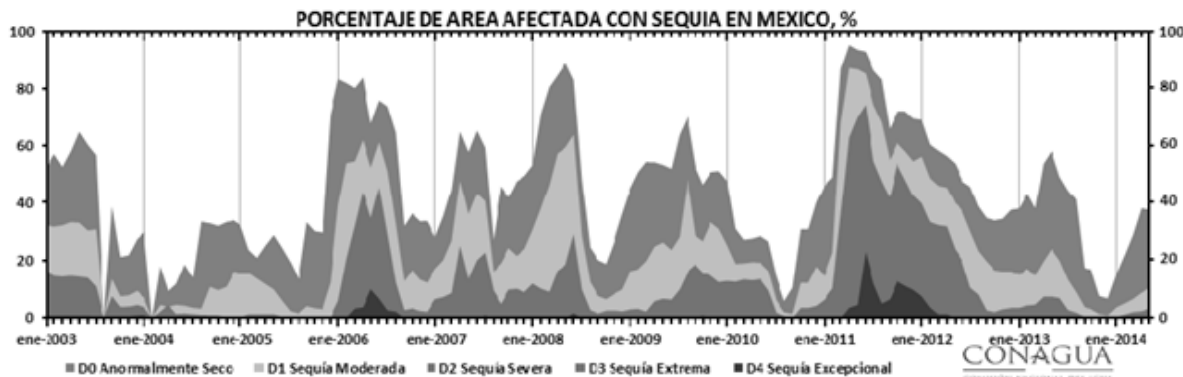


Figura 1. Porcentaje de área afectada por sequía en México (enero de 2003 a mayo de 2014).

Las sequías de los años recientes han afectado grandes extensiones agrícolas y comunidades rurales y urbanas, y han propiciado severos desbalances en la economía regional y nacional (Figuras 1 y 2; CONAGUA, 2012). En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo proponer una manera menos subjetiva de evaluar y dimensionar la vulnerabilidad a la sequía, como un breve aporte al entendimiento y evaluación del fenómeno global, con la intención abonar al enfoque proactivo orientado hacia la *gestión del riesgo* de sequía.



Figura 2. Regiones de México afectadas por sequía en junio de 2011.

Vulnerabilidad, uno de los parámetros claves de la sequía

Peligro, riesgo y vulnerabilidad con conceptos asociados, que en relación con la sequía, pueden concebirse según se muestra en la Figura 3 siguiente:

Con base en la metodología del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), la vulnerabilidad es una intersección de tres factores: Grado de Exposición (**Ge**), Sensibilidad (**Se**) y Capacidad de adaptación (**Ca**) (Figura 4). Es decir:

$$\text{Vulnerabilidad} = f(\text{Exposición}, \text{Sensibilidad}, \text{Capacidad Adaptación}) \text{ del sistema.}$$



Figura 3. Relación intrínseca en los conceptos de vulnerabilidad, peligro y riesgo, asociados al fenómeno de la sequía.

donde, para el caso de la sequía:

- El Grado de Exposición (**Ge**), es la magnitud en que los factores climáticos afectan al sistema, y es básicamente una función de la geografía (por ej. las zonas semiáridas están más expuestas a la sequía).
- La Sensibilidad (**Se**), representará el grado en que se ve afectada una cuenca, comunidad o ecosistema por estrés climático (por ej. Una localidad que dependa de la agricultura de temporal está más sensible a la variación de los patrones de precipitación que aquella donde el comercio o minería es el principal medio de subsistencia).
- La Capacidad de Adaptación (**Ca**), se refiere a la resiliencia de la región ante condiciones de sequía, es decir, al potencial de adaptarse al estrés impuesto por las sequías.



Figura 4. Vulnerabilidad, como producto de sus factores asociados.

De la definición de los tres factores, se pueden establecer dos enfoques de cálculo de la vulnerabilidad, ya sea como una suma del **Ge** y **Se** y restarle la **Ca**; o bien, manejarlo como un cociente, donde el producto de la **Ge** y la **Se** sean los numeradores y como denominador la **Ca**. En ambos casos, al existir mayor exposición y sensibilidad y una menor capacidad de adaptación se esperaría mayor vulnerabilidad a la amenaza del peligro; caso contrario, una mayor capacidad de adaptación en comparación a los otros dos parámetros, resultará una mejor capacidad de adaptarse al estrés hídrico o mayor potencial de adaptación.

Método aditivo	Método multiplicativo
Vulnerabilidad = $Ge + Se - Ca$ (1)	Vulnerabilidad = $(Ge * Se)/Ca$ (2)

De las dos expresiones conceptuales, solo se explora en este trabajo el método aditivo. Partiendo de que no hay una fórmula o metodología universalmente aceptada para cuantificar la vulnerabilidad de la estructura socio-económica-ambiental de una región a los eventos de sequía o déficit hídrico, existe un espacio para definir o elegir la que más conveniente o asequible, según cada caso.

Materiales y métodos

Para afrontar la sequía, en México se han diseñado y desarrollado los *Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía* (PMPMS; IMTA, 2013a, 2013b), con los cuales, para cada región hidrológica, se pretende contar con una herramienta metodológica que permita actuar proactivamente cuando el fenómeno se presente. En síntesis, tal proceso se muestra en la Figura 5.

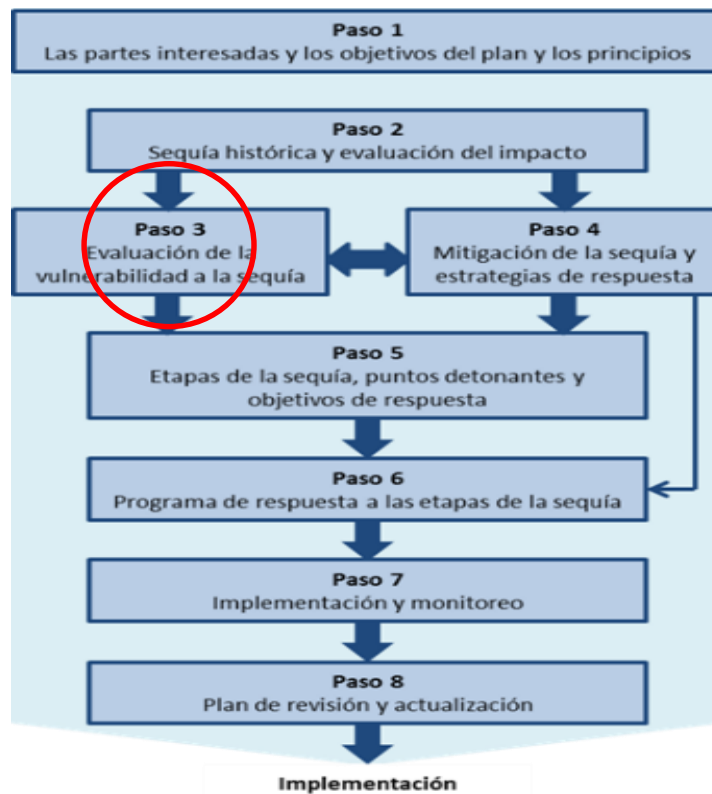


Figura 5. Proceso de elaboración de *Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía*.

Las premisas a discurrir en esta evaluación son, básicamente, las siguientes:

1. Considerar para el cálculo de la vulnerabilidad 11 factores, (Cuadro 1) divididos en tres componentes, grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.
2. Cálculo de la vulnerabilidad económica, social, ambiental y global.



3. Determinar el peso de los factores usando un cálculo matemático a través de la teoría de matrices (software *Superdecisions*®).
4. Considerar como unidad básica de estudio a la cuenca.

Cuadro 1. Factores (*f*) seleccionados para calcular la vulnerabilidad social, económica y ambiental.

Nombre	Grado de exposición	Sensibilidad	Capacidad de adaptación
Vulnerabilidad económica	f-1a f-1b	f-2a f-2b f-4a	f-3a f-3b
Vulnerabilidad social	f-1a f-1b	f-6c	f-3a f-3b
Vulnerabilidad ambiental	f-1a f-1b	f-5a	f-6a f-6b
Vulnerabilidad Global	f-1a f-1b	f-2a f-2b f-4a f-5a F-6c	f-3a f-3b f-6a f-6b

Factor 1a (f-1a). Grado de presión sobre el recurso hídrico (oferta/demanda)

Factor 1b (f-1b). Grado de explotación en los acuíferos

Factor 2a (f-2a). Densidad de población al año 2010

Factor 2b (f-2b). Valor de la producción del sector agrícola (riego y temporal)

Factor 3a (f-3a). Disponibilidad natural *per cápita* de aguas superficiales

Factor 3b (f-3b). Disponibilidad natural *per cápita* de aguas subterráneas

Factor 4a (f-4a). Población económicamente activa (PEA) desocupada (%)

Factor 5a (f-5a). Deforestación (% de área forestal)

Factor 6a (f-6a). Cobertura vegetal natural (% de área)

Factor 6b (f-6b). Áreas naturales protegidas (% de área)

Factor 6c (f-6c). Índice de marginación %.

Vulnerabilidad Económica: se formula a partir de la relación indirecta entre los niveles de ingresos y el impacto de fenómenos físicos extremos; en el caso de la sequía, provocando el aumento en el riesgo de padecer el desastre debido a la falta de financiamiento a la producción, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral y la dificultad a los accesos de los servicios formales de salud, educación y recreación, entre otros.

Vulnerabilidad Social: surge y se fortalece ante la existencia de una deficiente organización y unión interna de la sociedad bajo riesgo, con el aumento del empobrecimiento, el desempleo y/o subempleo; limitando la capacidad de prevenir, mitigar y dar respuesta oportuna ante una situación del desastre por déficit hídrico.

Vulnerabilidad Ambiental: relacionada con la susceptibilidad intrínseca del medio o los recursos naturales a sufrir daños por la falta de agua: los seres humanos necesitan de ciertas condiciones ambientales mínimas para desarrollarse, y si en la naturaleza se presenta la destrucción de las reservas del ambiente, los ecosistemas resultan altamente vulnerables.

El Cuadro 2 muestra los principales factores que intervienen en el cálculo de los distintos tipos de vulnerabilidad (Ortega-Gaucin, 2014) los cuales están relacionados con la gestión y el uso del agua y que se considera reflejan en mayor medida las causas de la vulnerabilidad del sector hídrico. La información, en cada caso, se obtiene de las instituciones gubernamentales que la registran.

Cuadro 2. Definición de los factores para evaluar la vulnerabilidad ante la sequía.

Factor	Definición	Fórmula
Factor 1a (f-1a). Grado de presión sobre el recurso hídrico.	Se refiere al cociente entre la brecha hídrica y oferta sustentable.	$G_{presión} = \frac{Demanda - Oferta sustentable}{Oferta sustentable}$
Factor 1b (f-1b). Grado de explotación de los acuíferos	El agua subterránea se vuelve la principal fuente de suministro de agua ante un déficit hídrico.	Volúmenes expresados en hm ³
Factor 2a (f-2a). Densidad de población al año 2010	Es la relación entre el número de habitantes y el área de la cuenca.	$Densidad = \frac{No. Habitantes}{Área de la cuenca}$
Factor 2b (f-2b). Valor de la producción del sector agrícola (riego y temporal)	La estadística del valor obtenido de la producción cosechada es un indicador del grado de sensibilidad de la cuenca	Valor expresado en miles de pesos
Factor 3a (f-3a). Disponibilidad natural per cápita de aguas superficiales	Resulta de dividir la disponibilidad natural media total del agua superficial de la cuenca entre el número de habitantes.	Volúmenes expresados en hm ³
Factor 3b (f-3b). Disponibilidad natural per cápita de aguas subterráneas	Resulta de dividir la disponibilidad natural media total del agua subterránea de la cuenca entre el número de habitantes.	Volúmenes expresados en hm ³
Factor 4a (f-4a). Población económicamente activa (PEA) desocupada (%)	Se refiere a la relación entre la población económicamente activa desocupada y la población económicamente activa total	$PEA_{desocupada} = \frac{PEA desocupada}{PEA total}, (\%)$
Factor 5a (f-5a). Deforestación (% de área forestal)	Representa las áreas deforestadas, la cual conlleva a una drástica	$Deforestación = \frac{Área deforestada}{ÁREA total}, (\%)$



Factor	Definición	Fórmula
	disminución en el suministro de agua, aparte de romper el equilibrio climático.	
Factor 6a (f-6a). Cobertura vegetal natural (% de área)	La forma e intensidad en que se modifican la cubierta vegetal determina la persistencia de los ecosistemas y, por lo tanto, de los recursos que estos proporcionan.	$Cober. veg. nat. = \frac{\text{Área cober veg nat}}{\text{ÁREA total}}, (\%)$
Factor 6b (f-6b). Áreas naturales protegidas (% de área)	Representan a las áreas legalmente protegidas para salvaguardar sus valores naturales, como son las reservas de la biosfera, parques naturales, santuarios, monumentos naturales, etc.	$\text{Áreas natur proteg} = \frac{\text{Área nat prot}}{\text{ÁREA total}}, (\%)$
Factor 6c (f-6c) Índice de marginación %.	El índice de marginación es una medida resumen de nueve indicadores socioeconómicos que permiten medir formas de la exclusión social y que son variables de rezago o déficit, siendo los tres más importantes: el porcentaje de población analfabeta, el porcentaje de población sin educación básica completa y el porcentaje de población en viviendas con piso de tierra.	Es una combinación lineal de los indicadores estandarizados

La metodología está basada en nueve pasos, donde los primeros tres consisten en definir el área de estudio y los factores a interrelacionar, así como las principales fuentes para recopilar la información; los paso cuatro y cinco sean los medulares del cálculo y consisten en realizar el análisis y procesamiento de la información, y va desde rellenar los datos faltantes para cada uno de los factores, modularlos y concentrarlos en un cuadro base que contenga en un mismo arreglo todas las cuencas; en el caso del paso cinco, consistirá en obtener los pesos de cada uno de los factores usando el software *Superdecisions*® (SUPERDECISIONS, 2014).

Respecto al paso 6, se considera el cálculo de la vulnerabilidad usando el enfoque de sumar el grado de exposición más la sensibilidad y restarle la capacidad de adaptación. Para cada tipo de vulnerabilidad, los factores se agruparán en **Grado de Exposición**, **Sensibilidad** y **Capacidad de Adaptación**, según la Tabla anterior. Se multiplicará el valor modulado de cada factor por su



peso (resultado del software *Superdecisions*®), obteniéndose así cada una de las componentes de la vulnerabilidad, como un promedio ponderado de los factores **Ge**, **Se** y **Ca**.

$$\text{Promedio ponderado} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

A los valores obtenidos de cada una de las cuencas se les clasifica en muy baja, baja, media, alta y muy alta (Cuadro 3), y se representan en un SIG con tal de visualizar la distribución espacial de la misma.

Cuadro 3. Valores convencionales numéricos de la vulnerabilidad estimada.

Rango	Valor mínimo	Valor máximo
Muy alta	0.59001	1.000
Alta	0.29001	0.59
Media	0.15001	0.29
Baja	0.06001	0.15
Muy baja	0.000	0.06

Desde luego, la vulnerabilidad, evaluada según este criterio, no tiene una distribución lineal o proporcional, sino que es progresiva. A todos los datos (valores determinados) de cada factor y para cada cuenca se les aplicó la modulación con el objeto de homogeneizar los valores en un rango de [0,1]. La ecuación utilizada para modular los datos por factores en un rango entre [0,1] es:

$$\text{Modulación} = \frac{(factor_i) - Min_{matriz}}{Máx_{matriz} - Min_{matriz}} \quad (2)$$

Después de estimar y normalizar los valores de los factores propuestos, se calcularon los pesos de cada factor usando el software *Superdecisions*® (Figura 6).

Para cada cuenca que integra a la región hidrológica, se multiplica el valor modulado del dato de cada factor por su peso (resultado del software *Superdecisions*®); obteniendo como un promedio ponderado cada una de las componentes (**Ge**, **Se** y **Ca**), según la vulnerabilidad en cuestión. Es así como el valor de la Vulnerabilidad para cada cuenca queda determinado con la siguiente expresión:

$$\text{Vulnerabilidad} = Ge + Se - Ca \quad (3)$$

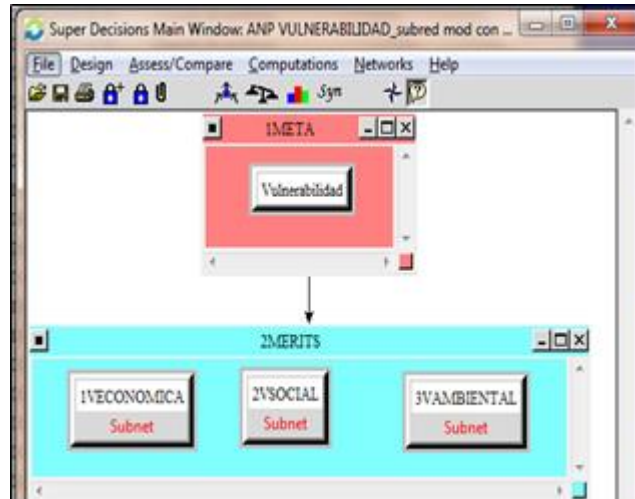


Figura 6. Modelo conceptual parcial de la evaluación de la vulnerabilidad mediante *Superdecisions*®

Análisis y discusión de resultados

Con estas ideas y criterios, y con la información base para cada cuenca, es entonces posible obtener un valor numérico de la vulnerabilidad, desde los enfoques ambiental, social y económico, y como agregación o combinación de estos, la vulnerabilidad global. Los resultados son numéricos, pero para mejor apreciación y objetividad espacial, esos valores se representan en la cuenca respectiva y en el mapa de la región hidrológica se muestran en las figuras siguientes (los números mostrados en cada cuenca corresponden a la identificación de la misma, según los criterios, nomenclatura y metodologías de la Comisión Nacional del Agua).

A pesar de que la región hidrológica es en general, árida y semiárida, sus características geográficas, fisiográficas y socio demográficas hacen que no sea homogénea; igualmente, los recursos hídricos tampoco están regularmente distribuidos en su geografía. Por estas razones, los resultados de la vulnerabilidad según lo aquí expuesto, son indicativos de estas diferencias; ello implica que hay subregiones o cuencas que son más susceptibles a la sequía y por tanto más vulnerables en alguno o varias de sus facetas.

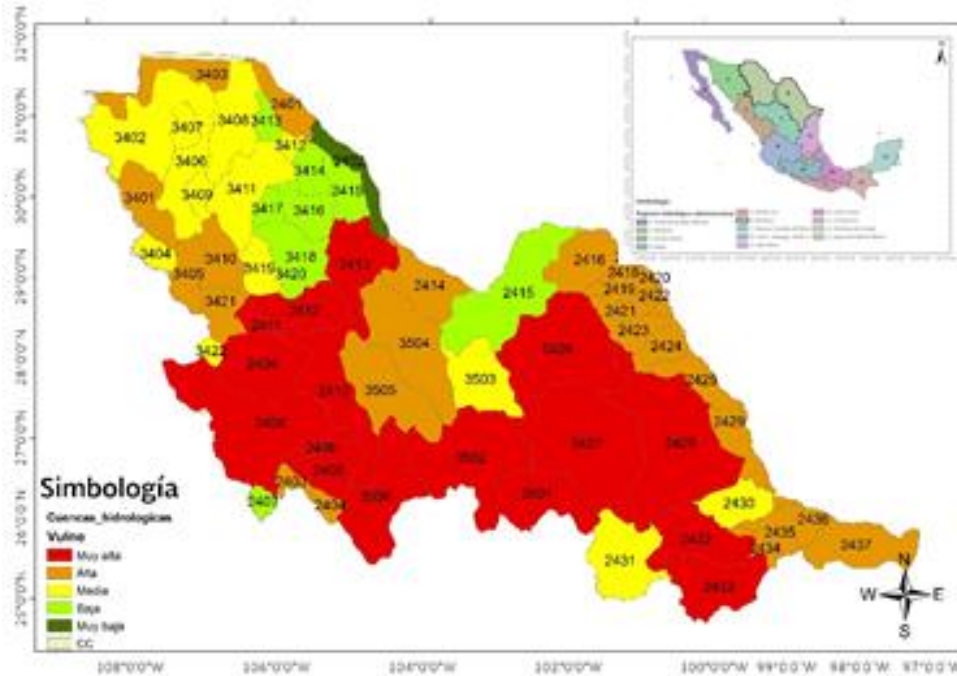


Figura 7. Vulnerabilidad ambiental por cuenca, en la región hidrológica del Río Bravo.

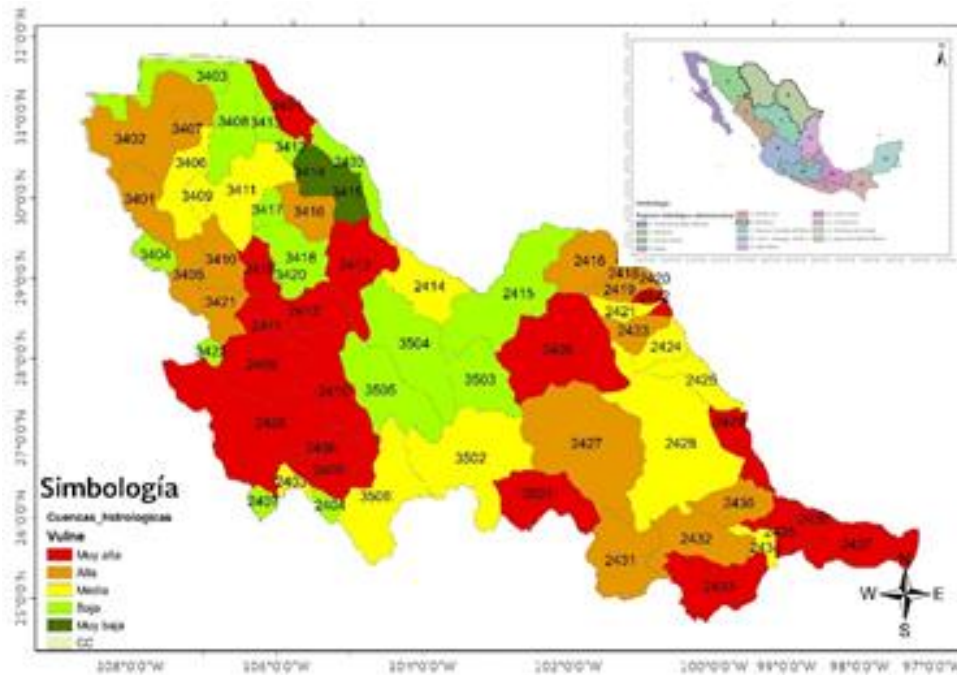


Figura 8. Vulnerabilidad económica por cuenca, en la región hidrológica del Río Bravo.

Las Figuras 7 a 10 muestran estos resultados, por cuenca, representados en una escala cromática conveniente, equivalente a los valores numéricos; ahí pueden apreciarse las diferencias geográficas de la vulnerabilidad espacial, en sus diferentes facetas, y la global, lo que se constituye en una herramienta de valor y

apoyo para el diseño y ejecución de los programas y políticas destinados a mitigar el efecto negativo de la sequía.

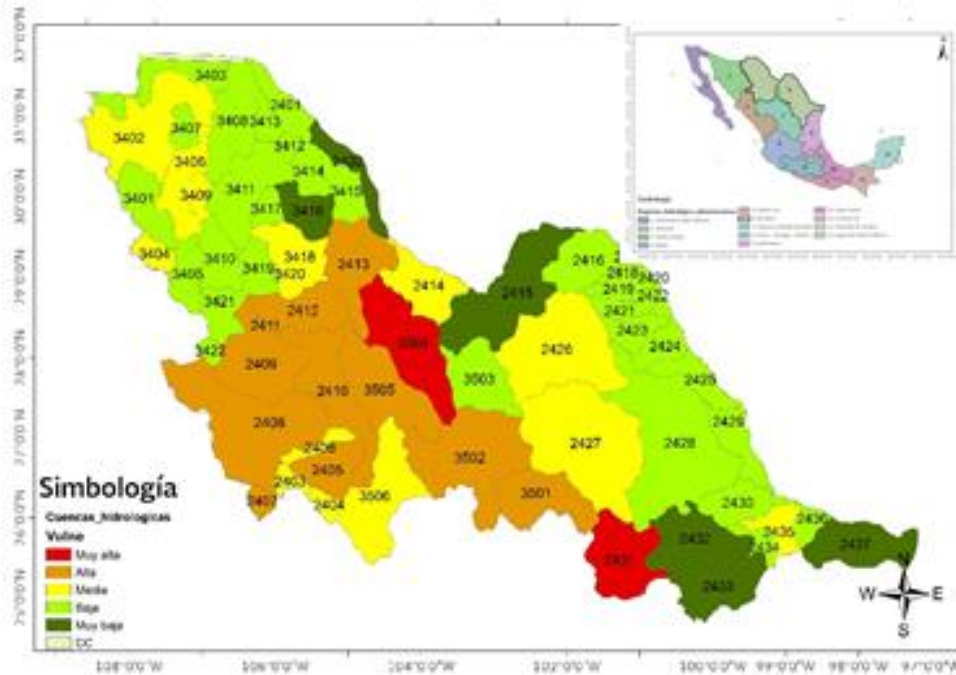


Figura 9. Vulnerabilidad social por cuenca en la región hidrológica del Río Bravo.

Conclusiones

La vulnerabilidad es un concepto relativamente ambiguo y subjetivo, sin embargo, es determinante en la evaluación de la sequía y, por ende, en los programas y acciones que se diseñen para afrontar y mitigar sus efectos. En este trabajo se presenta un método preliminar para dimensionar la vulnerabilidad, y de esta manera poder hacerla más manejable en esos programas.

Versiones y avances posteriores podrían enfocarse en la evaluación, además de por cuenca, por municipio y estado, dado que las políticas públicas y recursos para atender el fenómeno se asignan y ejercen en estas instancias geopolíticas y administrativas.

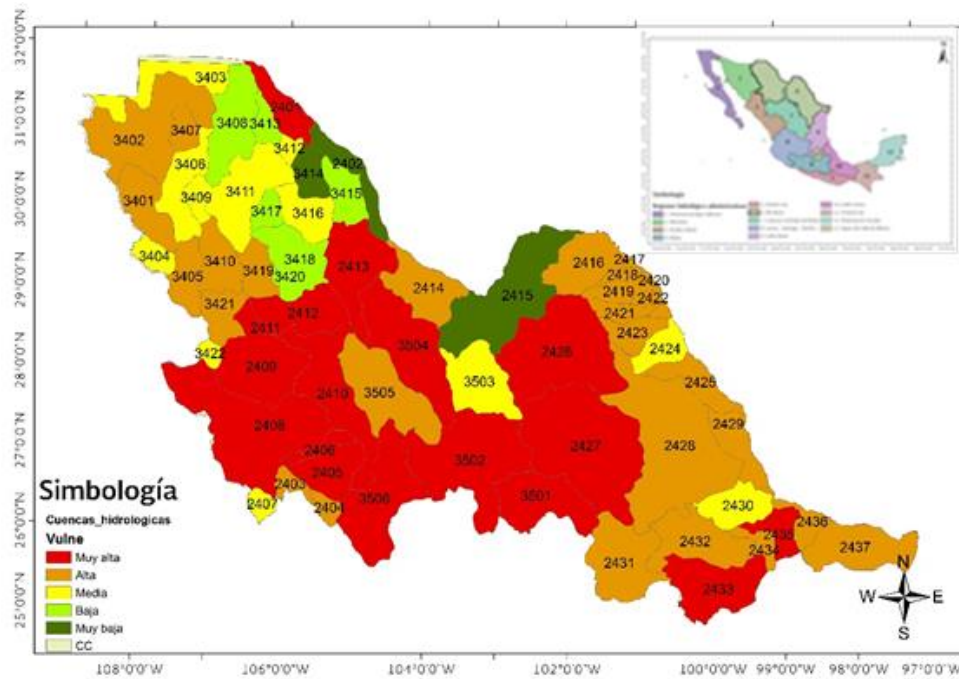


Figura 10. Vulnerabilidad global por cuenca en la región hidrológica del Río Bravo.

Referencias bibliográficas

- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2007. Fascículo Sequías. Secretaría de Gobernación. México, D.F. 36 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México. SEMARNAT. México, D.F. 43 pp.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2013a. Programas para la prevención y mitigación de sequías (documento de soporte teórico). SEMARNAT. Jiutepec, Morelos. 61 pp.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2013b. Guía para la formulación de programas de prevención y mitigación de sequías. SEMARNAT. Jiutepec, Morelos. 58 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Summary for policymakers. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, USA.



Ortega-Gaucin, David. 2012. Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Apodaca, N.L. 222 pp.

Superdecisions®. 2014. <http://www.superdecisions.com/>