

MONITORIZACIÓN DE SEQUÍAS EN MÉXICO A TRAVÉS DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO MULTIVARIADO DE SEQUÍA

Real Rangel, Roberto Alejandro^{1,2}; Pedrozo Acuña, Adrián²; Breña Naranjo, José Agustín²; Alcocer Yamanaka, Víctor Hugo^{1,3}

¹Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México; Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 04510, México; +52 (55) 5550 9383

²Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México; Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 04510, México; +52 (55) 5623 3600

³Comisión Nacional del Agua; Insurgentes Sur 2416, 01020, Cd. Mx., México; +52 (55) 5174 4000

rrealr@iingen.unam.mx (principal); apedrozoa@iingen.unam.mx; jbreña@iingen.unam.mx; yamanaka@conagua.gob.mx

Resumen

Debido a la variabilidad climática normal en cada región, es normal que ocurran periodos de déficit de humedad, conocidos como sequías, a lo largo de todo el planeta. Una adecuada gestión del riesgo y vulnerabilidad ante este fenómeno natural es posible mediante programas y planes encaminados a evitar que su ocurrencia se convierta en un desastre natural. En este sentido, la definición de medidas a adoptar encuentra un importante apoyo en la monitorización de sequías. El presente estudio tiene como objetivo implementar y evaluar un marco de trabajo multivariado para la monitorización de sequías en México, a través del que sea posible cuantificar de manera objetiva la intensidad y magnitud de los eventos de sequía en todo el territorio nacional, utilizando para ello fuentes de información proveniente de sistemas de AD globales.

En el presente estudio, la intensidad de la sequía ha sido caracterizada usando el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI), que es una versión extendida del ampliamente usado Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), con el objetivo de combinar la información obtenida de dos (o más) variables relacionadas con la sequía (*e. g.*, precipitación y humedad del suelo) empleando la distribución de probabilidad conjunta de ambas variables, estimada con ayuda de un modelo multivariado de punteo (probabilidad empírica). Los resultados de este estudio muestran que el uso de múltiples variables para monitorizar la intensidad de sequía a través del MSDI permite detectar la propagación del déficit de agua a través del sistema hidrológico con información específica de cada variable analizada. Además, el uso conjunto del MSDI con los índices estandarizados univariados de las variables integradas en el primero, permite definir la ponderación que cada una presentó sobre la intensidad en cada paso de tiempo analizado. Esto hace posible el análisis detallado de cada evento y estimar la variación del impacto principal a lo largo de su duración.

Introducción

En todo el mundo, la monitorización de eventos extremos, tales como las sequías, es una actividad fundamental para los tomadores de decisiones. A partir de ésta, es posible identificar las regiones afectadas y se activan los protocolos de respuesta

una vez iniciado un evento (Wilhite, 2000). Dicha información puede ser usada por planeadores, gestores de emergencias, tomadores de decisiones y legisladores, entre otros, para implementar programas y políticas que ayuden a reducir la vulnerabilidad asociada a la amenaza natural. Esta actividad incluye la recolección y análisis de datos, el desarrollo de productos de datos (*e. g.*, índices) y su comunicación a la sociedad.

En este sentido, diversos estudios han reconocido que el análisis de una sola variable hidrológica es insuficiente para definir el inicio, la persistencia y la terminación de un evento de sequía en forma precisa (AghaKouchak, 2015; Dracup et al., 1980; Hao y AghaKouchak, 2013; Kao y Govindaraju, 2010). Esto se debe a que cada variable responde de forma distinta ante la variación de humedad. Por ejemplo, el déficit de precipitación puede desarrollarse de manera rápida y terminar de una manera abrupta, mientras que el comienzo del déficit en la humedad del suelo responde con cierto retraso temporal a esta condición.

Por otro lado, el reciente desarrollo tecnológico de las técnicas e instrumentos de percepción remota para la monitorización espacial de variables relacionadas con el ciclo hidrológico ha permitido refinar su resolución espacial y temporal, lo que ha redundado en su utilización como fuentes de información para el análisis de sequías. Lo anterior ha permitido la creación de sistemas de monitorización y evaluación de sequía a diferentes escalas espaciales (*e. g.*, regional, nacional, global). Dichos sistemas integran observaciones derivadas de distintas fuentes de información (*e. g.*, percepción remota, radares en tierra, estaciones de aforo, etc.) con resultados de modelos climatológicos, hidrológicos y de superficie terrestre.

Algunos ejemplos pueden encontrarse en el Monitor de Sequía de los Estados Unidos de América (*U. S. Drought Monitor*, USDM; <http://droughtmonitor.unl.edu>; Svoboda et al., 2002), el Observatorio Europeo de Sequía (*European Drought Observatory*, EDO; <http://edo.jrc.ec.europa.eu>; Sepulcre-Canto et al., 2012) y el Monitor Africano de Inundación y Sequía (*African Flood and Drought Monitor*; <http://stream.princeton.edu/AWCM/WEBPAGE>; Sheffield et al., 2014). Todos, con un enfoque multivariable.

En México, existe el Monitor de Sequía en México (MSM; <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>), operado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La metodología seguida por este sistema está basada en la del USDM, que obtiene e interpreta diversos índices o indicadores de sequía tales como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI; McKee et al., 1993), porcentaje de la normal, Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI, Kogan, 1997), el Modelo de Humedad del Suelo *Leaky Bucket* (Huang et al., 1996), el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI; Tarpley et al., 1984), la anomalía de la temperatura media y el porcentaje de disponibilidad de agua en las presas del país. El proceso de interpretación finaliza con la aportación de expertos locales, quienes, mediante consenso, definen las regiones afectadas por sequía y sus severidades.

Esta metodología tiene como principales fortalezas el uso conjunto de información derivada de técnicas de percepción remota, observaciones directas y la opinión de expertos en la materia. Sin embargo, en un escenario en el que la disponibilidad y calidad de los registros hechos *in situ* (estaciones de aforo) son limitadas, pierde robustez. Este es el caso de extensas regiones en México en donde la medición de estas variables es muy pobre o nula (ver la Figura 1), lo que provoca una importante discontinuidad espacial de la exactitud de los resultados de este sistema.

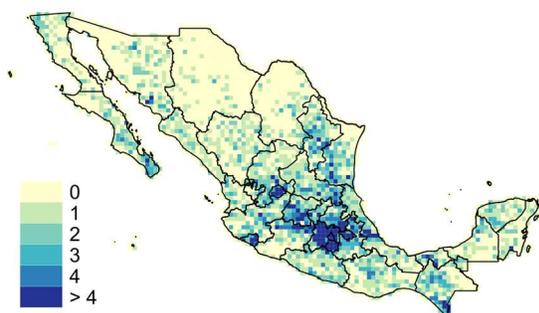


Figura 1. Cantidad de estaciones climatológicas en operación (2015) en México por celda de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

El presente estudio tiene por objetivo implementar y evaluar un marco de trabajo multivariado para la monitorización de sequías en México a través del cual sea posible cuantificar de manera objetiva la intensidad y magnitud de los eventos de sequía en todo el territorio nacional, utilizando para ello fuentes de información de última generación, como son los conjuntos de datos globales de variables hidroclimatológicas.

Metodología

Fuentes de información

La metodología seguida en el presente trabajo integra información derivada de un sistema global de asimilación de datos (AD) y análisis retrospectivo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos de América (NASA) para la estimación nacional de índices multivariados de variables hidrológicas relacionadas con la

sequía. De esta manera, se hace uso de los últimos avances en el estado del arte para la generación de un marco de trabajo moderno que permita una mejor estimación de la severidad de la sequía en México. La representación espacial de las variables por medio de una retícula a lo largo del territorio nacional permite la generación de mapas donde se muestra la distribución espacial de la intensidad, magnitud y persistencia de sequía en México.

El conjunto de datos empleado es el llamado *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (MERRA; Rienecker et al., 2011). Usa la versión 5 del modelo *Goddard Earth Observing System* (GEOS-5) y su sistema de asimilación de datos (DAS) para generar un reanálisis atmosférico. El reanálisis combina campos generados por modelaciones con observaciones de distribuciones espacial y temporal irregulares para formar un conjunto de datos meteorológicos mallados. MERRA incorpora observaciones convencionales que consisten en variables atmosféricas estándar, como son la presión, temperatura, altitud y las componentes del viento, obtenidas mediante estaciones climatológicas, globos, naves aéreas, embarcaciones y boyas.

En 2014 fue lanzada la versión más reciente del producto: MERRA-2. El nuevo sistema incluye la asimilación de la radiación hiperspectral y observaciones de microondas, así como conjuntos de datos de radioocultación de GPS, y avances en el modelo GEOS-5 y su sistema de asimilación de datos. Además, MERRA-2 usa datos de precipitación basados en observaciones como forzamiento para la parametrización de la superficie terrestre (Bosilovich et al., 2016).

Evaluación de los conjuntos de datos de asimilación de datos

La calidad de las series de tiempo de variables hidrológicas es de crítica importancia en el análisis de sequías, como en todo estudio hidrológico. Todo modelo, aun cuando sus bases físicas estén correctamente fundadas, producirá resultados erróneos si la información de entrada no caracteriza adecuadamente la magnitud y variación de la variable que reporta. Con esto en mente, se ha llevado a cabo una evaluación de las variables hidrológicas derivadas del producto MERRA-2 usado como insumo para este análisis de sequías en México.

Las series de tiempo derivadas de este producto han sido comparadas con las de las observaciones *in situ* de precipitación y escurrimiento obtenidas de la red de estaciones hidrométricas y climatológicas. Debido a la falta de información para evaluar la humedad del suelo, en este estudio se asumirá que la calidad de la información correspondiente a dicha variable es similar a la del resto evaluadas.

Diez estaciones de aforo fueron seleccionadas en todo el país para evaluar la información que ofrece el producto de AD: cinco climatológicas y cinco hidrométricas. El criterio seguido para la selección de las estaciones climatológicas usadas fue que sus longitudes de registro contaran con, al menos, 30 años de datos, y que abarcaran en conjunto la mayor extensión posible del país. En cuanto a la elección de estaciones hidrométricas para la revisión del flujo superficial, el criterio fue más riguroso debido a que esta variable es mucho más sensible a la influencia antropogénica y los elementos de sus series de tiempo son susceptibles a perder homogeneidad y aleatoriedad por cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca aforada o por

la instalación de controles, como obras de almacenamientos, captación o descarga, etc. Por lo tanto, fueron escogidas estaciones hidrométricas cuyo registro cumpliera con los siguientes criterios:

- la extensión del registro es de, al menos, 30 años;
- la cantidad de datos faltantes y discordantes no alcanza al 10 % de la muestra;
- la serie de tiempo es homogénea; y
- la serie de tiempo es independiente.

Las métricas de ajuste analizadas fueron el coeficiente de determinación (r^2), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) y el índice de concordancia (d). Para ver los detalles del cálculo de estas métricas, se refiere al lector a las publicaciones de Krause et al. (2005) o Moriasi et al. (2007).

Índices estandarizados de sequía

La definición de sequía adoptada en este estudio es la propuesta por McKee et al. (1993), que describe las condiciones de una variable relativas a la climatología de largo plazo. Este enfoque está basado en las variables hidrológicas estandarizadas. Una variable hidrológica estandarizada consiste en la diferencia que existe entre el valor analizado y la media, dividida entre la desviación estándar, donde la media y la desviación estándar son determinadas a partir de los registros históricos con suficiente información. Es uno de los enfoques más usados y ha sido recomendado por el Taller Interregional de Índices y Sistemas de Alerta Temprana para la Sequía (WMO, 2009) para su uso en todos los servicios meteorológicos nacionales. El índice es calculado para una escala temporal (ventana móvil de promediado), que puede ser de $i = 3, 6, 12$ meses, etc. y su elección depende del grado de detalle en que desee conocerse la fluctuación de la humedad. En general, los índices de escalas temporales de 3 meses son útiles en el análisis del balance estacional de agua; así mismo, los índices con escalas temporales de 12 meses permiten evaluar el balance de agua durante un año hidrológico completo, sin considerar fluctuaciones de corta duración.

Típicamente, el índice estandarizado de sequía es derivado mediante el ajuste de una función de distribución de probabilidad a los datos de precipitación. La probabilidad acumulada es luego transformada a la función de distribución acumulada (CDF) de la distribución normal estándar. Sin embargo, Farahmand y AghaKouchak (2015) propusieron simplificar la obtención de la probabilidad acumulada empleando la ecuación de punteo de Gringorten (1963), que se expresa como sigue:

$$P(x_i) = \frac{i - 0.44}{N + 0.12} \quad (1)$$

donde N es el tamaño de la muestra, i denota la posición del dato de precipitación no nula en orden ascendente, y $p(x_i)$ es la probabilidad empírica correspondiente.

Una vez obtenido el valor de la probabilidad, el índice estandarizado (SI) se determina como sigue:

$$SI = \varphi^{-1}(p) \quad (2)$$

donde φ es la función de distribución normal estándar y p es la probabilidad derivada de la Ecuación 1.

Se considera como sequía a un periodo continuo de valores negativos del SI en el que se haya alcanzado al menos un valor inferior o igual que -1.0 . El inicio de la sequía es determinado en el mes correspondiente al primer valor negativo del SI. El final de la sequía se define en el siguiente mes con valor positivo.

La propuesta original de McKee et al. (1993) aplicó este enfoque en el análisis de la precipitación, dando lugar al Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Sin embargo, estudios posteriores han demostrado su aplicación con otras variables, como el escurrimiento (SRI; Shukla y Wood, 2008) y la humedad del suelo (SSI; Hao y AghaKouchak, 2013), entre otros.

Hao y AghaKouchak (2014, 2013) propusieron un Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI), que es una versión extendida del SI, con el objetivo de combinar la información obtenida de dos (o más) variables relacionadas con la sequía (e. g., precipitación y humedad del suelo) usando la probabilidad empírica derivada mediante el modelo multivariado de punteo de Gringorten, presentado por Yue et al. (1999), misma que se expresa como sigue:

$$P(X \leq x_i, Y \leq y_j) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml} - 0.44}{N + 0.12} \quad (3)$$

Donde $\sum_{m=1}^i \sum_{l=1}^j n_{ml}$ representa al número de pares de observaciones en los que $X \leq x_i, Y \leq y_j$. Una vez que la probabilidad conjunta ha sido calculada con la Ecuación 3, se emplea como entrada para calcular el MSDI con la Ecuación 2. Ha sido adoptada la categorización de severidad de sequía empleada por el MSM y el USDM, misma que se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías de intensidad de sequía y humedad en función del valor del índice estandarizado (SI) de sequía (Svoboda et al., 2002)

Rango	Categoría	Clave
$SI \leq -2.0$	Sequía excepcional	D4
$-2.0 < SI \leq -1.6$	Sequía extrema	D3
$-1.6 < SI \leq -1.3$	Sequía severa	D2
$-1.3 < SI \leq -0.8$	Sequía moderada	D1
$-0.8 < SI \leq -0.5$	Anormalmente seco	D0
$-0.5 \leq SI < 0.5$	Normal	
$0.5 \leq SI < 0.8$	Anormalmente húmedo	W0
$0.8 \leq SI < 1.3$	Moderadamente húmedo	W1
$1.3 \leq SI < 1.6$	Severamente húmedo	W2
$1.6 \leq SI < 2.0$	Extremadamente húmedo	W3
$SI \geq 2.0$	Excepcionalmente húmedo	W4

En el presente estudio se han calculado y comparado resultados de tres combinaciones de variables para el MSDI. Con el objetivo de agilizar la referencia a cada una de las combinaciones, se ha adoptado la nomenclatura mnemotécnica siguiente:

MSDI-PreRun: Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*) y escurrimiento (*runoff*).

MSDI-PreSMo: Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*) y humedad del suelo (*soil moisture*).

MSDI-PreSMoRun: Índice Estandarizado Multivariado de Sequía para las variables de precipitación (*precipitation*), humedad del suelo (*soil moisture*) y escurrimiento (*runoff*).

Además, se presentan los resultados de los índices estandarizados univariados, derivados con la metodología del SI. Éstos son: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), de Escurrimiento (SRI) y de Humedad del Suelo (SSI).

Elaboración de mapas de sequía

La elaboración de mapas de sequía se llevó a cabo aplicando las metodologías a los conjuntos de datos mallados de los productos de AD consultados. La Figura 2 muestra un esquema del arreglo en que fueron ordenados los valores obtenidos de los productos consultados. La extensión espacial de los valores extraídos corresponde a un recuadro que delimita al territorio nacional con límites en entre 86° y 119° longitud Oeste y 14° y 34° latitud Norte. Siguiendo la nomenclatura de la Figura 2 $I = \{i_{lat}: 14 < lat < 34\}$ y $J = \{j_{lon}: -86 < lon < -119\}$. Por otro lado, fue analizado el total de la extensión temporal disponible. De este modo, $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ es la lista de los periodos mensuales disponibles en el producto MERRA-2, que inicia en enero de 1980 abarca hasta el presente.

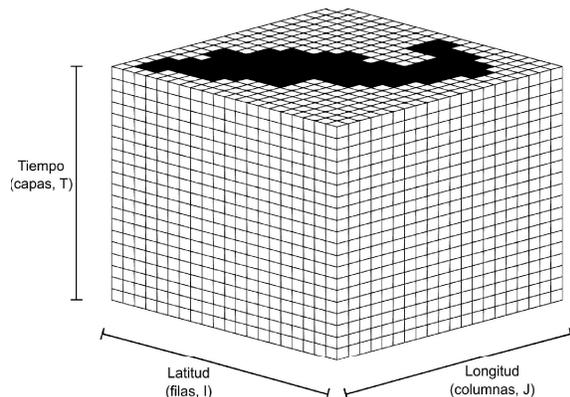


Figura 2. Arreglo de los datos extraídos de los productos de asimilación de datos.

A partir del arreglo descrito, se calcularon los índices estandarizados tomando como base la serie de tiempo X correspondiente a cada pareja de coordenadas (i, j) , es decir, $X^{(i,j)} = \{x_t^{(i,j)}: t \in T\}$. En el caso del análisis multivariado, las series de tiempo están formadas por grupos —parejas o triadas— de valores, es decir, $(X, Y)^{(i,j)} = \{(x, y)_t^{(i,j)}: t \in T\}$. Las series de tiempo de los índices de sequía calculados fueron ordenadas en un arreglo similar al de los datos de entrada (Figura 2), de modo que cada capa (t) formó un mapa de SI con el resultado para cada pareja de coordenadas (i, j) .

El arreglo de resultados fue remuestreado con una resolución de $1/16^\circ$ para conseguir un efecto “natural” de la variación espacial de los SI en los mapas generados. Las técnicas de interpolación más usadas para la generación de mapas de variables hidroclimatológicas son los métodos *kriging*, *spline* y la distancia inversa ponderada (IDW). Estas técnicas requieren

una importante carga de cómputo y, debido al gran volumen de información por procesar, en este estudio se aplicó una interpolación lineal, cuyo cómputo es significativamente más sencillo. No obstante, la generación de mapas con otras técnicas de interpolación deberá ser considerada en trabajos futuros.

Resultados

Sitios empleados durante la evaluación de MERRA-2

El conjunto de sitios de aforo que formaron parte de la evaluación del producto MERRA-2 consistió en cinco estaciones hidrométricas y cinco estaciones climatológicas. La Figura 3, la Tabla 2 y Tabla 3 muestran la localización e identificación de las estaciones seleccionadas. Los criterios para su selección fueron descritos en el apartado anterior.



Figura 3. Localización de las estaciones climatológicas (círculos etiquetados con “C”) e hidrométricas (triángulos etiquetados con “H”) usadas para la evaluación del producto MERRA-2.

Tabla 2. Estaciones climatológicas usadas para evaluar la variable de precipitación del producto MERRA-2.

Clave	Nombre	Región hidrológica	Localización		
			Lat [°]	Lon [°]	Alt [m]
C-01004	Cañada Honda	Lerma-Santiago	22.001	-102.199	1 925
C-02033	Mexicali	Río Colorado	32.663	-115.468	3
C-06003	Callejones	Armería-Coahuayana	18.816	-103.634	30
C-07168	Tonalá	Costa de Chiapas	16.084	-93.744	55
C-30068	Los Ídolos	Papaloapan	19.408	-96.516	100

Tabla 3. Estaciones hidrométricas usadas para evaluar la variable de escurrimiento del producto MERRA-2.

Clave	Nombre	Región hidrológica	Localización	
			Lat [°]	Lon [°]
H-09067	San Bernardo	Sonora Sur	27.412	-108.883
H-12428	Bolaños	Lerma-Santiago	21.828	-103.785
H-24301	Tepehuaje	Bravo-Conchos	25.496	-99.768
H-29006	J. Carranza II	Coatzacoalcos	17.392	-95.053
H-36039	La Flor	Nazas-Aguanaval	25.092	-103.325

Evaluación del producto MERRA-2: Precipitación

El producto mostró una eficiencia aceptable en las estaciones climatológicas que se encuentran dentro de clima tropical. Por el contrario, la estación climatológica localizada en una región

de clima seco (C-02033, Mexicali) presentó el desempeño más pobre del conjunto evaluado. En términos generales, fueron encontrados mejores resultados de ajuste de los campos de precipitación de MERRA-2 en las estaciones con elevados valores de precipitación mensual acumulada en sus registros (ver la Figura 4).

El sitio en cuya magnitud de precipitación es mejor reproducida por el producto de AD es la estación C-07168 (Tonalá; con $r^2 = 0.84$, $E = 0.84$ y $d = 0.95$), seguido de la estación C-06003 (Callejones; con $r^2 = 0.84$, $E = 0.81$ y $d = 0.94$), ambos en las costas del Océano Pacífico, al Sur del país. En contraste, el sitio donde se encontraron métricas de eficiencia más pobres fue la estación C-02033 (Mexicali; con $r^2 = 0.46$, $E = -0.71$ y $d = 0.73$). La **Tabla 4** resume los resultados de las mediciones de ajuste en los cinco sitios revisados.

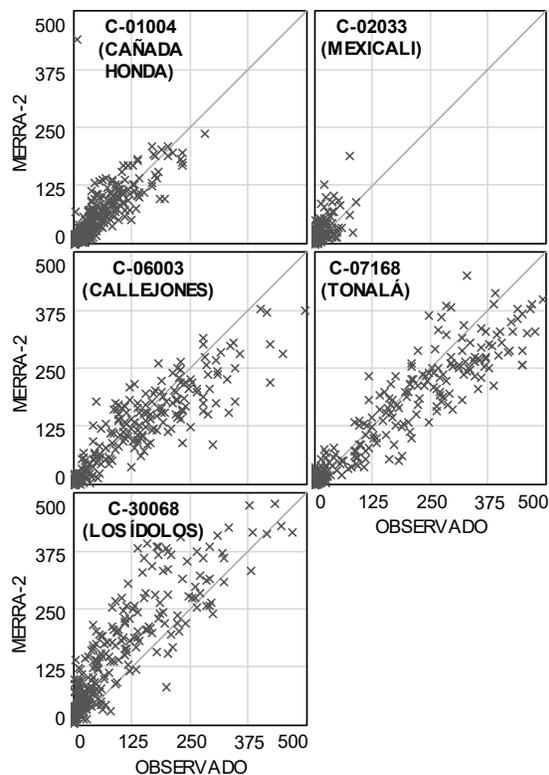


Figura 4. Precipitación mensual acumulada (en mm) derivada de las observaciones directas contra la derivada de MERRA-2. La línea gris indica el ajuste perfecto.

En términos generales, puede considerarse aceptable el desempeño del producto MERRA-2 para reproducir la variable de precipitación.

Evaluación del producto MERRA-2: Esguerrimiento

En términos generales, MERRA-2 exhibe un desempeño más pobre en sus campos de esguerrimiento, en comparación con los campos de precipitación (ver la Figura 5).

Tabla 4. Métricas de ajuste de la variable precipitación derivada del producto MERRA-2.

Estación climatológica	r^2	E	d
C-01004	0.73	0.70	0.92
C-02033	0.46	-0.71	0.73
C-06003	0.84	0.81	0.94
C-07168	0.89	0.84	0.95
C-30068	0.80	0.47	0.89

Este resultado se anticipaba dado que los campos de esguerrimiento superficial y esguerrimiento base, de los que se conforma el campo total de esguerrimiento, son producto de un modelo de superficie terrestre, en contraste con el campo de precipitación, que consiste en observaciones basadas en percepción remota. No obstante, se encontraron algunos ajustes aceptables. El sitio de aforo en el que se identificó mejor desempeño por parte del producto MERRA-2 fue en la estación H-09067 (San Bernardo; con $r^2 = 0.62$, $E = 0.56$ y $d = 0.84$), seguido del sitio H-24301 (Tepehuaje; con $r^2 = 0.74$, $E = 0.49$ y $d = 0.78$). Por el otro lado, los ajustes más pobres se encontraron en el sitio de la estación H-29006 (Jesús Carranza II; con $r^2 = 0.31$, $E = -0.09$ y $d = 0.71$). La **Tabla 5** resume los resultados de la revisión de ajuste de los campos de esguerrimiento del producto con los valores registrados directamente en las cinco estaciones de aforo empleadas en la evaluación.

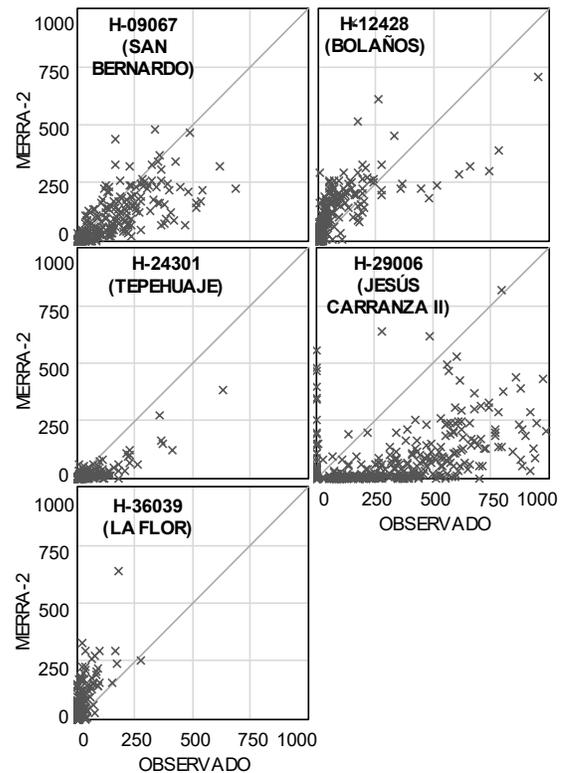


Figura 5. Esguerrimiento acumulado mensual (en hm^3) derivado de las observaciones directas contra el derivado del producto MERRA-2. La línea gris indica el ajuste perfecto.

Tabla 5. Métricas de ajuste de la variable escurrimiento derivada del producto MERRA-2.

Estación climatológica	r^2	E	d
H-09067	0.62	0.56	0.84
H-12428	0.00	-128.26	0.02
H-24301	0.74	0.49	0.78
H-29006	0.24	-0.47	0.55
H-36039	0.19	-16.92	0.31

Al respecto de la estación Jesús Carranza II, se observó que su flujo tiene una importante componente subsuperficial reflejada en la presencia de gasto base durante todo el año. Es posible que los modelos de superficie terrestre del producto MERRA-2 no haya sido capaz de simular este flujo, por lo que subestiman sistemáticamente el escurrimiento. De comprobarse esta hipótesis en estudios futuros, esto representaría la limitación más crítica de los conjuntos de datos evaluados.

Puede concluirse de esta evaluación que MERRA-2 logra reflejar la dispersión y magnitud de los indicadores analizados, con ciertas limitaciones importantes que deberán ser analizadas a profundidad.

Aplicación de los índices multivariados para monitorización de sequías: Oaxaca 2015-presente

Con el objetivo de validar la aplicabilidad operacional de los índices multivariados en la detección de sequías, a continuación, se presenta una reproducción del evento de sequía que desde 2015 hasta los resultados más actualizados (diciembre de 2016) está ocurriendo en el estado de Oaxaca. Para esto, serán empleados los mapas de sequía generados con la metodología descrita en el apartado anterior.



Figura 6. Localización del estado de Oaxaca (área sombreada).

La Figura 7 muestra las series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio para el estado de Oaxaca, para una escala temporal de 1 mes.

La serie de tiempo del SPI_{01} presenta un periodo de cuatro meses (junio-octubre/2015) con déficit de precipitación (sequía meteorológica) con una intensidad máxima de $SPI_{01} = -0.9$ durante el mes de agosto/2015. Este evento se ve reflejado también en un déficit de escurrimiento (sequía hidrológica) detectado mediante la serie de tiempo del SRI_{01} , que persiste hasta noviembre de 2015 y presenta su punto crítico en agosto de ese año, con una intensidad de $SRI_{01} = -1.0$. El análisis del

SSI_{01} permite identificar un periodo de déficit de humedad del suelo (sequía agrícola) entre julio/2015 y marzo/2016, con su mayor intensidad durante el mes de agosto/2015, con un valor de $SSI_{01} = -1.3$. Además, este último índice muestra otro evento sostenido de sequía agrícola que inició en mayo/2016 y hasta el mes de diciembre aún continuaba.

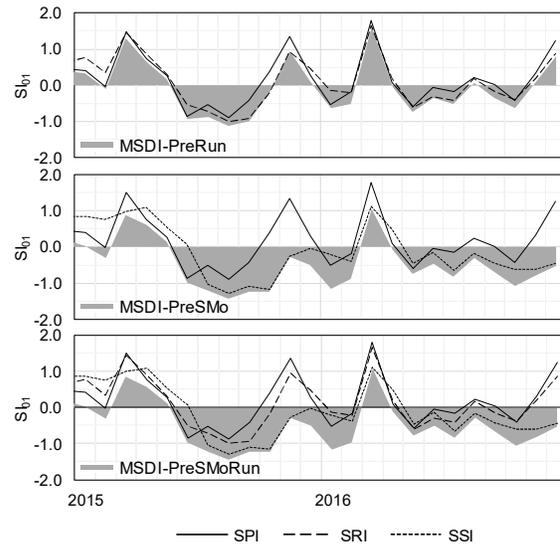


Figura 7. Series de tiempo de los índices estandarizados de sequía promedio en el estado de Oaxaca en el periodo 2015-2016.

También en la Figura 7, puede observarse en área sombreada las series de tiempo de los distintos índices estandarizados multivariados, acompañadas de las series de tiempo de los índices estandarizados univariados correspondientes a las mismas variables. Resalta de esta figura que la variable más sostenidamente afectada por el déficit de agua es la humedad del suelo. Mientras que la serie de tiempo del MSDI-PreRun muestra una intermitencia entre condiciones anormalmente secas y anormalmente húmedas después de mayo/2016, los dos índices multivariados que toman en cuenta a la humedad de suelo (MSDI-PreSMo y MSDI-PreSMoRun) indican un solo evento sostenido de sequía que hasta el mes de diciembre/2016 continuaba y que había alcanzado hasta dicha fecha una intensidad pico durante el mes de octubre/2016 con un valor de $MSDI-PreSMoRun_{01} = -1.07$, lo que le otorga la categoría de sequía moderada al evento.

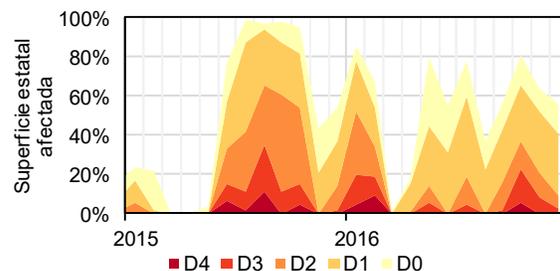


Figura 8. Variación temporal del porcentaje de área estatal de Oaxaca afectada por sequía en el periodo 2015-2017.

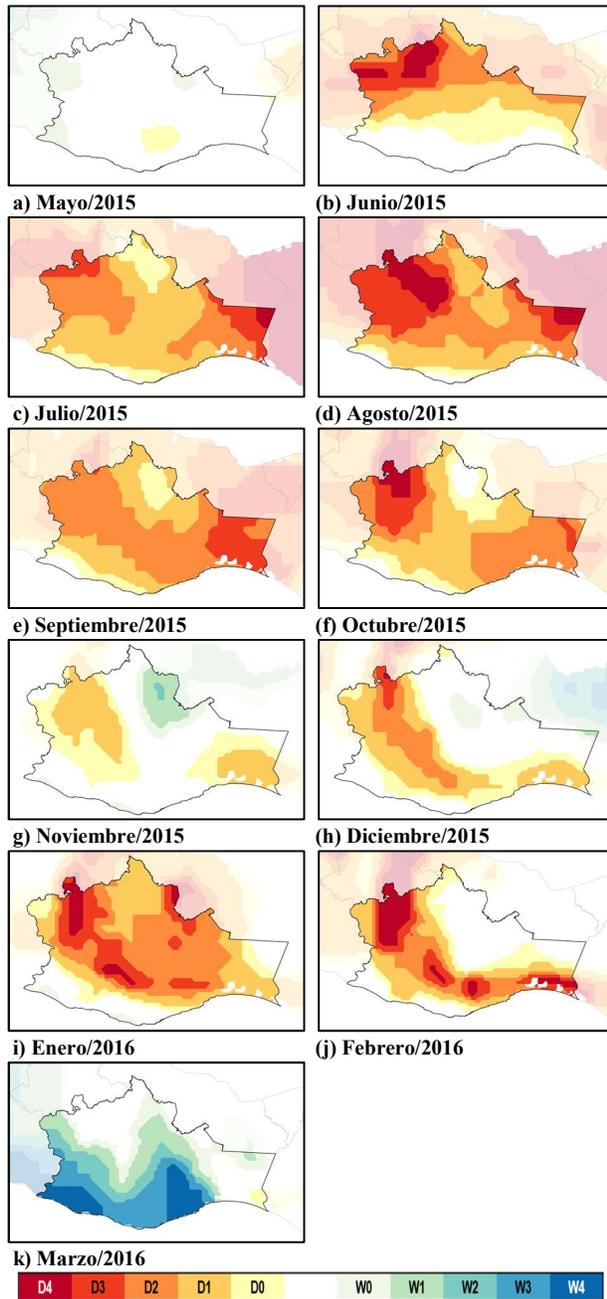


Figura 9. Distribución espacial de la intensidad de la sequía en el estado de Oaxaca en el periodo enero-noviembre de 2016.

En la Figura 9 se presenta una secuencia mensual de la distribución espacial de la intensidad de la sequía identificada en el estado de Oaxaca durante el periodo junio/2015-marzo/2016, mediante el índice multivariado MSDI-PreSMoRun₀₁, descrito arriba. Así mismo, en la Figura 10 se presenta la correspondiente al evento del periodo abril/2016-presente.

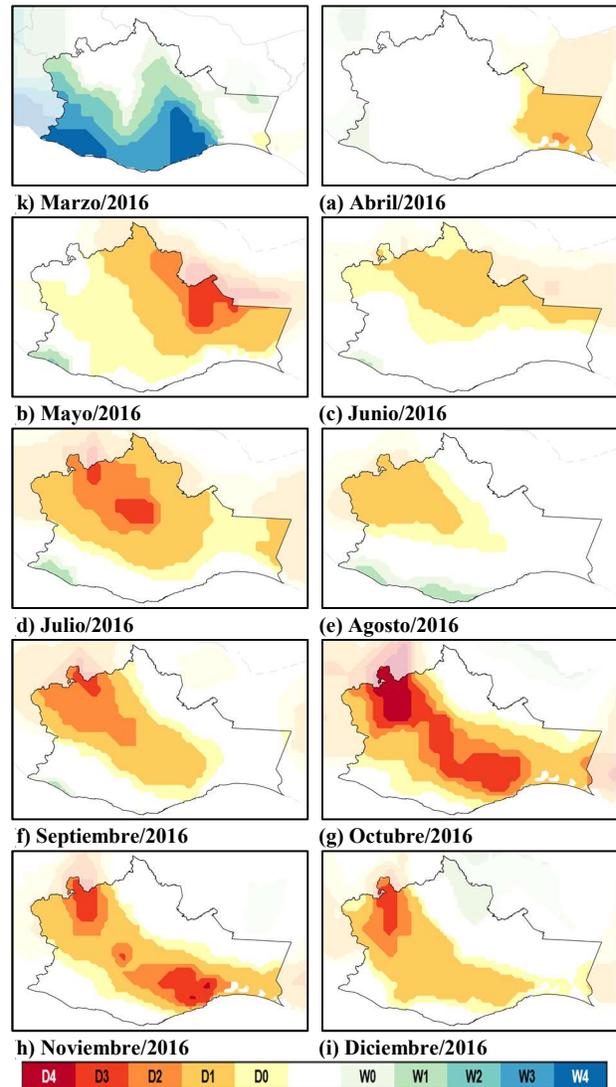


Figura 10. Distribución espacial de la intensidad de la sequía en el estado de Oaxaca en el periodo abril-diciembre de 2016.

Con ayuda de estas secuencias de mapas, pueden ser observados los periodos de sequía en el estado de Oaxaca, separados únicamente por un mes en condiciones medias se superávit de humedad (marzo de 2016). Si bien gran parte del estado ha estado en condiciones de sequía desde 2015, la regiones Mixteca, Valles Centrales y Sierra Sur han sido presentado déficit de humedad durante más tiempo.

Conclusiones

El presente estudio ha empleado un enfoque multivariado para el monitoreo de sequías en México a través del Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI) propuesto por Hao y AghaKouchak (2014), empleando series de tiempo de variables hidrológicas derivadas de productos de modelos de superficie terrestre que incorporan asimilación de datos (AD). Con base en los resultados obtenidos se ha llegado a una serie de conclusiones, que a continuación se describen.

El uso de múltiples variables para monitorear la intensidad de sequía a través del MSDI permite detectar la propagación de la sequía a través del sistema hidrológico con información específica de cada variable analizada. Esto evita el uso de ventanas móviles para reflejar artificialmente los impactos de una sequía en distintas fuentes de agua.

Los resultados de este índice multivariado permiten reflejar toda la extensión temporal de un evento de sequía en una sola serie de tiempo.

Una limitación importante para este método es la disponibilidad y homogeneidad de información necesaria para ser incluida en el índice multivariado. No obstante, el acelerado avance de los productos globales de datos hidroclimáticos mallados ofrece una valiosa alternativa para cubrir esta limitación.

Los mapas de sequía generados a partir del MSDI han logrado reproducir eficientemente las condiciones de déficit ocurridas en el estado de Oaxaca desde 2015 hasta el presente.

El uso conjunto del MSDI y los índices estandarizados univariados de las variables integradas en el primero, permite definir la ponderación sobre la intensidad que cada una presentó en cada paso de tiempo analizado. Esto hace posible el análisis detallado de cada evento y estimar la evolución de los principales impactos a lo largo de su duración.

Agradecimientos

Este estudio ha sido llevado a cabo como parte del proyecto final de tesis de Maestría en Ingeniería Civil dentro del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, durante una estancia de investigación en el Instituto de Ingeniería de dicha Universidad. Su desarrollo fue principalmente financiado por la Comisión Nacional del Agua (convenio de trabajo SGT-GASIR-DF-16-09-RF-CC). Además, la beca de manutención otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología es ampliamente agradecida.

Referencias

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. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.063

Bosilovich, M.G., Lucchesi, R., Suarez, M.J., 2016. MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1).

Briseño, P., 2015. Sequía pega a 100 municipios de Oaxaca; causa estragos en sembradíos. *Excelsior*.

Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson Jr., E.G., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16, 297–302. doi:10.1029/WR016i002p00297

EFE, 2016. Templo del siglo XVI emerge del agua en Oaxaca. *El Universal*.

Farahmand, A., AghaKouchak, A., 2015. A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources* 76, 140–145. doi:10.1016/j.advwatres.2014.11.012

Hao, Z., AghaKouchak, A., 2014. A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *Journal of Hydrometeorology* 15, 89–101. doi:10.1175/JHM-D-12-0160.1

Hao, Z., AghaKouchak, A., 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57, 12–18. doi:10.1016/j.advwatres.2013.03.009

Huang, J., van den Dool, H.M., Georgakakos, K.P., 1996. Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931–1993) and applications to long-range temperature forecasts. *Journal of Climate* 9, 1350–1362. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<1350:AOMCSM>2.0.CO;2

Kao, S.C., Govindaraju, R.S., 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology* 380, 121–134. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.029

Kogan, F.N., 1997. Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 621–636. doi:10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences* 5, 89–97. doi:10.5194/adgeo-5-89-2005

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, en: *Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Anaheim, California, pp. 179–184.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50, 885–900. doi:10.13031/2013.23153

Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J.T., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G.K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., Da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P.J., Redder, C.R., Reichle, R.H., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., Woollen, J., 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate* 24, 3624–3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1

Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H., Vogt, J. V., 2012. Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Science* 12, 3519–3531. doi:10.5194/nhess-12-3519-2012

Sheffield, J., Wood, E.F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., Olang, L., Amani, A., Ali, A., Demuth, S., Ogallo, L., 2014. A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan african water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, 861–882. doi:10.1175/BAMS-D-12-00124.1

Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35, 1–7. doi:10.1029/2007GL032487

Svoboda, M.D., LeCompte, D., Hayes, M.J., Heim, R., Gleason, K., Angel, J.R., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., Stephens, S., 2002. Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological*

- Society 1181–1190. doi:10.1175/1520-0477(2002)083<1181:TDM>2.3.CO;2
- Tarpley, J.D., Schneider, S.R., Money, R.L., 1984. Global Vegetation Indices from the NOAA-7 Meteorological Satellite. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0491:GVIFTN>2.0.CO;2
- Vargas, M., 2016. Sequía extrema en Oaxaca. *El Imparcial*.
- Wilhite, D.A., 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions, en: *Drought: A global assessment*. Routledge Publishers, London, pp. 3–18.
- WMO, 2009. Lincoln Declaration on Drought Indices, Wmo.
- Yue, S., Ouara, T.B.M.J., Bobée, B., Legendre, P., Bruneau, P., 1999. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* 226, 88–100. doi:10.1016/S0022-1694(99)00168-7