



INGENIERIA

INGENIERIA

AlejandroCoutinho

INCIDENCIA DE LAS SEQUÍAS SOBRE LAS CUENCAS APORTANTES A LOS GRANDES EMBALSES EN VENEZUELA

Ivis Quiroz Ruiz¹, Franklin Paredes Trejo² y Edilberto Guevara Pérez³

Recibido: 11 de diciembre de 2015

Evaluated: 05 de febrero de 2016

Aceptado: 30 de marzo de 2016

Resumen:

Desde el año 2000 el territorio venezolano ha sido afectado por sequías recurrentes que han causado una merma significativa en las reservas hídricas almacenadas en sus grandes embalses. Se evaluaron las características más relevantes de las sequías severas que afectaron las cuencas aportantes de 32 grandes embalses entre 1960-2005. Se empleó el índice de precipitación estandarizada para medir la anomalía de la precipitación acumulada a escala anual (SPI-12). El patrón subyacente que configura las sequías en el contexto espacio-temporal se identificó aplicando un análisis por conglomerados. Entre los resultados, destacan: a) las sequías son eventos relativamente frecuentes que se alternan con periodos predominantemente húmedos; b) los grandes embalses se agrupan en ocho subregiones geográficas de acuerdo a su exposición a las sequías; c) el inicio y la finalización de las sequías en las cuencas aportantes pueden ser abruptas o graduales en el tiempo.

Palabras clave: variabilidad climática, Venezuela, embalses, sequía hidrológica.

¹Venezolano. Candidato a Doctor. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional Ezequiel Zamora. Grupo de Investigaciones en Recursos Hídricos y Cuencas Hidrográficas – UNELLEZ-VIPI, San Carlos, Venezuela. E-mail: ivisquirozruiz@gmail.com. Teléfono: +58 426 5134538

²Venezolano. Doctor en Ingeniería. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Ezequiel Zamora. Grupo de Investigaciones en Recursos Hídricos y Cuencas Hidrográficas – UNELLEZ-VIPI, San Carlos, Venezuela. Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites – Instituto de Ciências Atmosféricas – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Brasil. E-mail: franklinparedes75@gmail.com. Teléfono: +58 258 2517675

³Venezolano. Doctor en Ingeniería. Profesor Emérito del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo. Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC), Valencia, Venezuela. E-mail: eguevara99@gmail.com. Teléfono: +51 948 657852

DROUGHTS EFFECT ON WATER FLOWS FROM LARGE RESERVOIRS IN VENEZUELA

Ivis Quiroz Ruiz¹ , Franklin Paredes Trejo² y Edilberto Guevara Pérez³

Abstract:

Since 2000 the Venezuelan territory has been affected by dry periods that caused a significant depletion in water reserves from large dams. The most important characteristics of mayor droughts that affected the water flows of 32 large reservoirs over the 1960-2005 period were evaluated. Standardized precipitation Index was used to measure the annual rainfall anomalies (SPI-12). The underlying pattern that configures the droughts in the space temporal context was identified by a cluster analysis. We have found that: a) dry periods are relatively frequent. They were alternated with wet periods; b) large reservoirs are gathered into eight geographic areas according to their exposure to droughts; c) droughts that affect the water flows can start or end suddenly or gradually in time.

Keywords: climatic variability, Venezuela, dams, hydrological drought.

IMPACTO DAS SECAS NAS BACIAS TIBUTÁRIAS DAS MAIORES BARRAGENS NA VENEZUELA

Ivis Quiroz Ruiz¹, Franklin Paredes Trejo² y Edilberto Guevara Pérez³

Resumo:

Desde 2000, o território venezuelano tem sido afetado por secas recorrentes que causaram um declínio significativo nas reservas de água armazenados nas maiores barragens do país. Foram avaliadas as características mais importantes das graves secas que afetaram as bacias hidrográficas que contribuem às 32 maiores barragens entre 1960-2005. O índice de precipitação padronizada foi utilizado para medir a anomalia da escala anual de precipitação acumulada (SPI-12). O padrão subjacente que configura a seca no contexto espaço-temporal foi identificado usando uma análise de conglomerados. Entre os resultados, destacam: a) as secas são eventos relativamente frequentes, que se alternam com períodos predominantemente úmidos; b) as maiores barragens são agrupadas em oito sub-regiões geográficas de acordo com a sua exposição às secas; b) o início e o fim das secas nas bacias tributarias pode ser abrupta ou gradual ao longo do tempo.

Palavras-chave: variabilidade climática, Venezuela, barragens, seca hidrológica.

Introducción

La sequía es un fenómeno climático que se caracteriza por la presencia de lluvias deficitarias o su ausencia durante un tiempo prolongado sobre una región geográfica determinada (Wilhite y Glantz, 1985; Carrillo, 1992). Esta condición produce severos impactos en los sectores agrícola, hidroeléctrico e hídrico (Charvériat, 2000). Dentro de la comunidad científica hay una creciente preocupación, pues los estudios más recientes muestran que las sequías han reducido los rendimientos de los cultivos bajo secano debido a que han incrementado su frecuencia y severidad sobre amplias regiones con vocación agrícola (Núñez, Verbist, Wallis, Schaefer, Morales y Cornelis, 2011; Dahal, Shrestha, Shrestha, Krakauer, Panthi, Pradhanang y Lakhankar, 2016). En Sudamérica, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento hídrico en algunas zonas propensas a las sequías se han visto afectadas por la ocurrencia de eventos muy persistentes (Garrido y Shechter, 2014; Vicario, García, Teich, Bertoni, Ravelo y Rodríguez, 2015; Pernalba y Rivera, 2016). En el caso particular de Venezuela, desde el año 2000 gran parte de su territorio ha estado expuesto a sequías prolongadas y recurrentes que han ocasionado cuantiosas pérdidas económicas y un creciente malestar social (Mendoza y Puche, 2014; Paredes y Guevara, 2013; Blunden y Arndt, 2015).

Cerca del 25% de las tierras venezolanas se destinan a la siembra extensiva de cultivos bajo secano (ejemplo: sorgo y maíz) y pasturas forrajeras (Pitman y Sotomayor-Rios, 2000; Rótoló, Francis y Ulgiati, 2011; FEDEAGRO, 2015). Esta actividad se concentra casi en su totalidad, en la región fisiográfica denominada Los Llanos. Los embalses multipropósitos de mayor capacidad a escala nacional también se encuentran en Los Llanos venezolanos (ej., Camatagua, Pao-Cachinche, Las Ma-

jaguas, Yacambu, entre otros). Por esta razón, los eventos secos más severos que allí ocurren afectan directamente al sector de los cereales y el mercado de los derivados cárnicos (Paredes, La Cruz y Guevara, 2014).

Es bien sabido que Venezuela es un país con abundantes reservas de petróleo; sin embargo, el 65% de la demanda eléctrica nacional es cubierta con fuentes hídricas. Una circunstancia agravante es el hecho de que la cuenca del río Caroní, situada al sureste del territorio venezolano, genera el 90% de la energía hidroeléctrica nacional (Guevara-Belloa, Vega-González y Guevara-Pérez, 2010; CORPOELEC, 2016). Esto significa, que las sequías sobre esta región del país pueden mermar la generación hidroeléctrica y por consiguiente, causar la paralización parcial o total de múltiples subsectores estratégicos (ej., siderúrgico, zonas industriales, entre otros). Lo anterior evidencia la complejidad del fenómeno de la sequía sobre el ámbito social y la globalidad de los sectores hídrico, hidroeléctrico y agrícola en Venezuela.

Las sequías sobre el territorio venezolano son comprendidas relativamente bien. Entre las contribuciones más relevantes sobre esta tema destacan: Mendoza y Puche (2014), Paredes et al. (2014) y Quiroz y Paredes (2015), estudiaron los patrones espaciales que configuran las sequías en el dominio temporal; Paredes, Millano y Guevara (2008) y Tim y De Guenni (2015), analizaron la asociación entre las sequías y ciertas pautas oceánico-atmosféricas; la Corporación Andina de Fomento (2000) y Martelo (2002) describieron la relación entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la variabilidad espacio-temporal de la precipitación a diferentes escalas temporales; Pulwarty, Barry y Riehl (1992), Poveda y Meza (1997) y Poveda, Waylen y Pulwarty (2006) analizaron la modulación que ejerce la

circulación atmosférica a gran escala sobre las sequías; Delgado y Castillo (2011), Chassaigne-Ricciulli, Barrientos-Acosta y Hernández-Jiménez (2012) y Colotti, Cedeño y Montañez (2013) examinaron la incidencia de las sequías sobre los rendimientos agrícolas de algunos cultivos bajo secano; Marmol (1994) y Soto, Florio, Tremont, Fuenmayor, Pérez y Sánchez (2009) se enfocaron en la tolerancia de las pasturas forrajeras ante estos eventos; finalmente, las sequías como fenómeno climático, en el contexto de la gestión de los recursos hídricos, fue explorada por Hernández (2008). El Instituto Internacional del Manejo de Agua (2000) también ha tratado este aspecto.

Una situación que preocupa a las agencias venezolanas encargada de la gestión de recursos hídricos es el severo impacto que han ocasionado las sequías sobre las reservas hídricas en los embalses venezolanos; en particular, desde el año 2000. La sequía del periodo 2015/16 ha recibido una amplia cobertura mediática, pues indujo una crisis hídrica multisectorial sin precedente en la historia reciente del país. Curiosamente, las características del fenómeno sequía dentro de las cuencas hidrográficas que tributan a los grandes embalses con uso agrícola, hidroeléctrico y/o abastecimiento humano no se han estudiado con suficiente detalle; a pesar de ser una información de gran importancia para la gestión de riesgo de sequías (Wilhite, 2012; Dahal et al., 2015).

La variabilidad temporal del volumen de agua almacenada en un embalse depende de múltiples factores de origen climático, hidrológico, geotécnico y geológico, así como de la operación del mismo; sin embargo, la ausencia de lluvia en la cuenca de aportación es el factor más importante. En efecto, si las lluvias no ocurren en cantidad suficiente durante la temporada húmeda, la demanda de agua tenderá a superar la disponibilidad en los meses siguientes (Encalada, 1994). Bajo esta

perspectiva, el análisis de largo plazo de las sequías en la cuenca de aportación puede proveer información relevante a las agencias encargadas del manejo de los embalses; en particular, cuan frecuentes son las rachas secas y sus cambios de tendencia. Estos indicadores permiten estimar el riesgo a las sequías de estas estructuras (Ayala-Carcedo y Cantos, 2002).

Las características más relevantes de una sequía son su inicio, intensidad, duración y momento de finalización. Estos parámetros pueden calcularse por medio de índices cuya formulación se basa en los registros de la precipitación y otras variables ambientales que se ven afectadas directa o indirectamente por la ausencia prolongada de lluvias (ej., la temperatura del aire, la evapotranspiración, el verdor de la vegetación, entre otros). En este punto, cabe destacar que las sequías se categorizan en tres tipos: meteorológica, agrícola e hidrológica, de acuerdo al tiempo que persista el déficit de lluvias y el medio físico más afectado (Wilhite y Glantz, 1985; Organización Meteorológica Mundial, 2006). Las sequías hidrológicas son las más prolongadas, por lo que se asocian con una reducción significativa del caudal afluente a los embalses.

Uno de los índices de mayor uso en el análisis de sequías es el índice de precipitación estandarizada (Standardized Precipitation Index (SPI, por sus siglas en inglés), (McKee, Doesken y Kleist, 1993). A diferencia de otros índices, el SPI solo requiere series largas de precipitación mensual. Otra fortaleza del SPI, es que puede usarse para analizar cualquiera de los tres tipos de sequías (meteorológica, agrícola o hidrológica), variando únicamente la escala temporal de agrupación de los registros de precipitación (Shukla y Wood, 2008). Por ejemplo, las sequías hidrológicas pueden ser monitoreadas al emplear un SPI con una escala temporal de 6, 9 o 12 meses, pues a estas escalas el SPI captura adecua-

damente la respuesta de las sequías sobre el flujo de los ríos (Nalbantis, y Tsakiris, 2009). Al usar estas agrupaciones, el SPI se suele representar con los acrónimos SPI-6, SPI-9 y SPI-12.

El impacto de las sequías sobre el nivel del agua en los principales embalses del país es un problema de gran pertinencia social, ambiental y económica. En este contexto, en el presente artículo se discuten detalladamente los resultados más relevantes derivado del análisis histórico de las sequías que incidieron en las cuencas aportantes de estos embalses.

Materiales y métodos

Unidad de estudio

Las cuencas de aportación de 32 embalses localizados dentro del territorio venezolano conforman la unidad de estudio. Las características de estas estructuras, así como la base cartográfica empleada fueron extraídas del Global Reservoir and Dam versión 1 (Lehner, Reidy Liermann, Revenga, Vörösmarty, Fekete, Crouzet, Döll, Endejan, Frenken, Magome, Nilsson, Robertson, Rödel, Sindorf y Wisser, 2011).

Registros pluviométricos

En cada cuenca de aportación se seleccionó una estación pluviométrica ubicada aguas arriba del vaso de almacenamiento; en lo sucesivo se denomina estación de referencia (Tabla 1; Figura 1). Dentro de esta zona de la cuenca pueden estar más de una estación disponible. Al darse este caso, se escogió aquella con la mayor longitud de registros pluviométricos y menor porcentaje de datos faltantes además de estar próxima a la parte me-

dia del tramo fluvial principal. Todas las estaciones analizadas son operadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y sus registros están disponibles en el website institucional (www.inameh.gob.ve/).

Las series de precipitación mensual en las estaciones de referencias cubren 46 años (periodo 1960-2005), con observaciones faltantes/atípicas $\leq 25\%$ (un registro mensual, fuera del rango, media \pm cuatro desviaciones estándar, secuencialmente repetido o englobado, se consideró atípico) y homogeneidad mensual verificada (prueba de homogeneidad normal estándar) (Guenni, Degryze y Alvarado, 2008). Los datos faltantes en cada una de estas estaciones se reemplazaron por la mediana calculada al tomar en cuenta los diez meses más similares al mes donde ocurrió el registro faltante, usando la distancia euclidiana entre casos estandarizados como métrica de similitud (Torgo, 2003).

Cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada

Las series de precipitación mensual en las estaciones de referencia se transforman al índice SPI-12 aplicando el siguiente procedimiento: i) agrupación anual móvil (mes calculado más los once meses previos); ii) ajuste mensual de cada subserie mensual a una función gamma de dos parámetros (estimados por máxima verosimilitud); iii) cálculo de la probabilidad acumulada de cada elemento, empleando una función gamma incompleta; iv) conversión de cada elemento a un valor normalizado. Este último es el SPI-12 (Paredes, Alvez y Guevara, 2015). A los efectos de este estudio, se estableció que una sequía ocurre cuando el SPI-12 es clasificado como severamente seco ($-2.00 < \text{SPI-12} \leq -1.50$) o extremadamente seco ($\text{SPI-12} \leq -2.00$) durante al menos cuatro meses consecutivos. La fundamentación estadística e interpretación del SPI es explicado en detalle

en Mendoza y Puche (2014). Las cuencas aportantes fueron agrupadas en grupos homogéneos, empleando un análisis de conglomerados jerárquico (Everitt, Landau, Leese y Stahl, 2011).

Detección de puntos de cambio

La serie temporal del SPI-12 en una estación de referencia puede presentar uno o más punto de cambio en su tendencia a lo largo del tiempo. Estos cambios suelen estar relacionados con perturbaciones temporales en los procesos físicos que modulan la precipitación (ej., eventos ENOS). En este estudio, las series de SPI-12 en las estaciones de referencias se han particionado iterativamente; seguido, las sub-series resultantes se ajustaron a un modelo lineal aditivo; finalmente, se evaluó la significancia estadística de la componente tendencia del referido modelo lineal. Este enfoque permitió identificar los puntos de cambios estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95% durante el periodo 1960-2005. La formulación de este método se detalla en Verbesselt, Hyndman, Newnhamy y Culvenor (2010).

Tabla 1.- Estaciones de referencias y embalses asociados analizados para el periodo 1960-2005

Serial	Precipitación (mm/año)	Elevación (msnm)	Nombre	Capacidad (m ³ x 10 ⁶)	Superficie drenada (Km ²)
263	996	1040	El Isiro	193	228
589	1114	395	Lagartijo	113	322
1019	1037	80	Tule	267.8	413
1059	1404	115	Pueblo Viejo	116	745
1149	997	292	Maticora	453.1	2368
1169	1314	156	Machango	110	569
1371	1408	435	Cumaripa	63.8	617
1395	1343	467	Pao-Cachinche	170	1130
1487	1398	750	Camatagua	1573.9	2100
1780	1606	1700	Turimiquere	550	348
1873	1030	834	El Guamo	155	472
1881	1443	379	Clavellinos	132.3	284

2144	1470	480	Agua Viva	156.4	4436
2176	954	1200	Bocono-Tucupido	3484.9	1606
2196	902	2200	Masparro	856.5	516
2204	478	682	Atarigua	420	2752
2227	1969	790	Yacambú	461	334
2251	830	950	Dos Cerritos	118.8	679
2427	1011	318	Tiznado	882.1	1447
2448	1107	205	Guárico	1840.4	8117
2505	1443	710	Taguaza	180	246
2507	1169	570	Guanapito	49	176
2539	953	176	El Cigarrón	246	3416
2589	895	784	El Pueblito	315	1623
2601	1024	355	El Guapo	155	472
2764	719	160	La Estancia	110.5	1940
3052	972	1000	Onia	52.6	295
3097	1386	1260	Uribante Caparo	775	1334
3712	991	240	La Becerra	469	1625
3994	1116	327	Macagua II	363	91653
6357	973	590	Las Majaguas	301.6	133
8319	2499	1235	Gurí	135000	87350

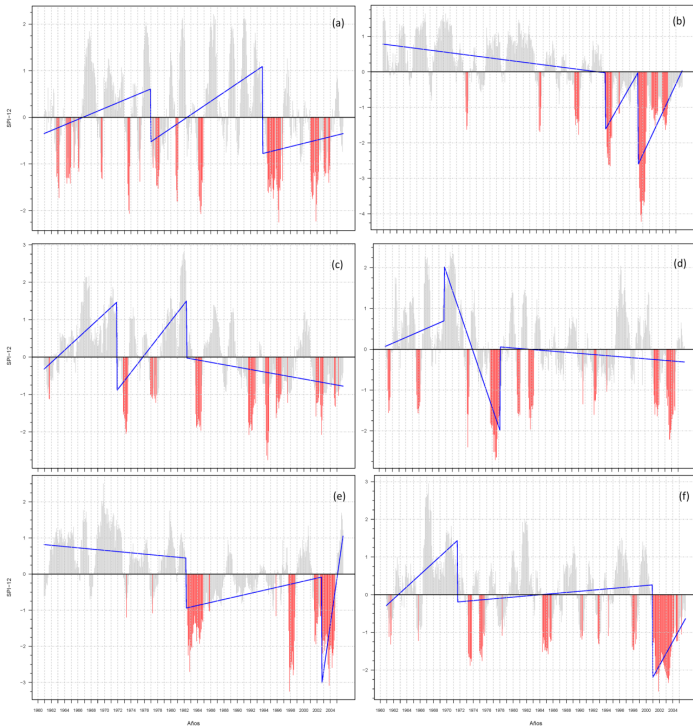
Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología para las estaciones de referencia. Global Reservoir and Dam versión 1 para los embalses asociados (Lehner et al., 2001)

Resultados y Discusión

Características de las sequías en las cuencas aportantes

Las Figuras 1 hasta la 5, muestran la variación del SPI-12 en las estaciones de referencias asociadas a los embalses listados en la Tabla 1, también incluyen los puntos de cambio detectados al aplicar el método de Verbesselt et al. (2010). Las características más relevantes de las rachas secas durante el periodo 1960-2005 en cada cuenca aportante basada en el análisis de las series SPI-12, se describen brevemente a continuación.

Figura 1. Series SPI-12 para el periodo 1960-2005 en las estaciones de referencia de los embalses: (a) El Isiro; (b) Lagartijo; (c) Tule; (d) Pueblo Viejo; (e) Maticora; y (f) Machango.



Fuente: calculos propios.

Nota: la línea azul indica la tendencia entre dos puntos de cambio. Las barras de color rojo muestra los meses en que $SPI-12 \leq -1.50$. Los puntos de cambios que se muestran son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

La cuenca aportante al embalse El Isiro (río Coro; estado Falcón), fue afectada por tres episodios secos durante el periodo 1960-2005: (i) 04/1984 a 08/1984 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -2.07); (ii) 01/1996 a 06/1996 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -2.25); (iii) 03/2001 a 06/2001 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.75). Se identificaron dos puntos de cambios en la tendencia del SPI-12 centrados en los meses 12/1972 y 10/1993. En ambos casos, sucedió una transición abrupta desde un periodo predominantemente húmedo con la presencia de rachas secas de corta duración hacia un periodo seco dominante con rachas secas de larga duración (Figura 1a).

Aguas arriba del embalse Lagartijo (río homónimo; estado Miranda), se registraron dos sequías de importan-

cia: (i) 08/1984 a 05/1995 (duración: 10 meses; máxima intensidad: -2.65); (ii) 06/1999 a 07/2000 (duración: 14 meses; máxima intensidad: -4.22). Antes de 1994, las sequías de corta duración en la cuenca aportante eran eventos esporádicos. Después de este año, ocurrieron sequías muy persistentes e intensas. Dos puntos de cambio en la tendencia del SPI-12 se observaron el 05/1994 y 04/1999, precediendo sequías muy intensas (Figura 1b).

En la cuenca del río Cachiri (estado Zulia), se encuentra el embalse Tule. Cuatro episodios secos afectaron su cuenca de aportación: (i) 01/1973 a 07/1973 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -2.05); (ii) 10/1983 a 07/1984 (duración: 10 meses; máxima intensidad: -1.96); (iii) 09/1991 a 05/1992 (duración: 9 meses; máxima intensidad: -2.07). Desde el 05/1982 hasta el final del periodo analizado se observó un incremento gradual en la ocurrencia de episodios secos (Figura 1c).

Cerca de la ciudad Lagunillas (estado Zulia), está ubicado el embalse Pueblo Viejo (río homónimo). Su cuenca de aportación estuvo expuesta a tres eventos secos: (i) 10/1976 a 02/1978 (duración: 17 meses; máxima intensidad: -2.71); (ii) 11/1980 a 03/1981 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.63); (iii) 08/2003 a 04/2004 (duración: 9 meses; máxima intensidad: -2.21). Una súbita inversión en las condiciones climáticas sucedió el 10/1969 y 03/1978; en efecto, una situación predominantemente húmeda dio paso a una fuerte sequedad (Figura 1d).

En el estado Falcón se localiza el embalse Maticora (próximo a la ciudad Mene de Mauroa). La cuenca de aportación de esta estructura fue afectada por cuatro sequías: (i) 08/1992 a 05/1983 (duración: 10 meses; máxima intensidad: -2.71); (ii) 04/1984 a 08/1984 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.92); (iii) 10/1997 a 08/1998 (duración: 11 meses; máxima intensidad:

-3.25); (iv) 10/2002 a 09/2004 (duración: 24 meses; máxima intensidad: -3.08). El 04/1982 sobrevino una abrupta inversión hacia condiciones climáticas predominantemente secas (Figura 1e).

El embalse Machango fue construido sobre el río homónimo del estado Zulia. Aguas arriba del vaso de almacenamiento se registraron dos episodios secos relevantes: (i) 04/1973 a 10/1973 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -1.88); (ii) 05/2001 a 10/2003 (duración: 30 meses; máxima intensidad: -2.56). El cambio de tendencia más significativo en la serie de SPI-12 de la estación de referencia ocurrió el 12/2000, coincidiendo con el inicio de una intensa y persistente sequía (Figura 1f).

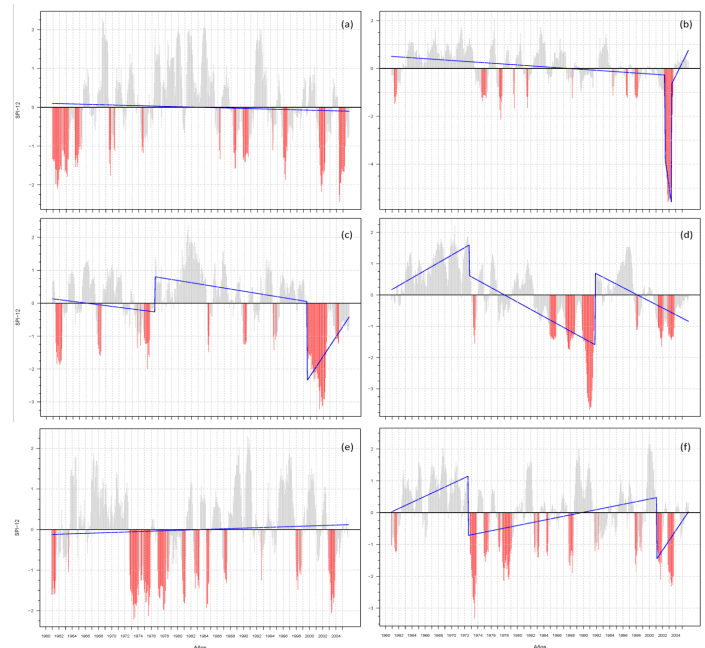
Próximo a la ciudad Chivacoa del estado Yaracuy se encuentra el embalse Cumaripa (río Yaracuy). Cuatro eventos secos de importancia impactaron su cuenca de aportación: (i) 05/1961 a 04/1962 (duración: 12 meses; máxima intensidad: -2.09); (ii) 11/1962 a 03/1963 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.79); (iii) 08/2001 a 03/2002 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -2.18); (iv) 06/2004 a 04/2005 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.44). A diferencia de las cuencas aportantes en otros embalses hasta ahora descritos, no se identificaron puntos de cambios en la serie de SPI-12, sugiriendo que los eventos secos y húmedos se alternan sin que ninguno de estos persistan a lo largo del tiempo (Figura 2a).

El embalse Pao-Chachinche fue construido en el año 1974 sobre un tramo del río Pao situado en el estado Cojedes. En su cuenca de aportación solo se registró una sequía de importancia entre el 05/2002 y 07/2003 (duración: 15 meses; máxima intensidad: -5.59). Este evento se refleja en una inversión gradual en la serie del SPI-12 (05/2002), desde condiciones predominate-

mente húmedas a severamente secas (Figura 2b).

El embalse de Camatagua es la principal fuente de abastecimiento hídrico de Caracas. Se localiza en el estado Aragua y embalsa las aguas del río Guárico. En su cuenca de aportación sucedieron dos episodios secos significativos: (i) 11/1961 a 04/1962 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -1.86); (ii) 10/1999 a 06/2002 (duración: 33 meses; máxima intensidad: -3.22). La inversión de tendencia en el SPI-12 más relevante se presentó el 07/1999, precediendo la sequía más persistente del periodo 1960-2005 (Figura 2c).

Figura 2. Series SPI-12 para el periodo 1960-2005 en las estaciones de referencia de los embalses: (a) Cumaripa; (b) Pao-Cachinche; (c) Camatagua; (d) Turimiquire; (e) El Guamo; y (f) Clavellinos.



Fuente: cálculos propios.

Nota: la línea azul indica la tendencia entre dos puntos de cambio. Las barras de color rojo muestra los meses en que $SPI-12 \leq -1.50$. Los puntos de cambios que se muestran son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

En el estado Sucre se localiza el embalse Turimiquire, cuyas aguas surten varios acueductos de los estados Sucre, Anzoátegui e Isla de Margarita. Se identificaron dos sequías severas en su cuenca de aportación: (i) 09/1987 a 01/1988 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.74); (ii) 04/1990 a 07/1991 (duración: 16 meses; máxima intensidad: -3.65). Se notó una fuerte inversión en el SPI-12 el 10/1991, posterior a un evento seco (Figura 2d).

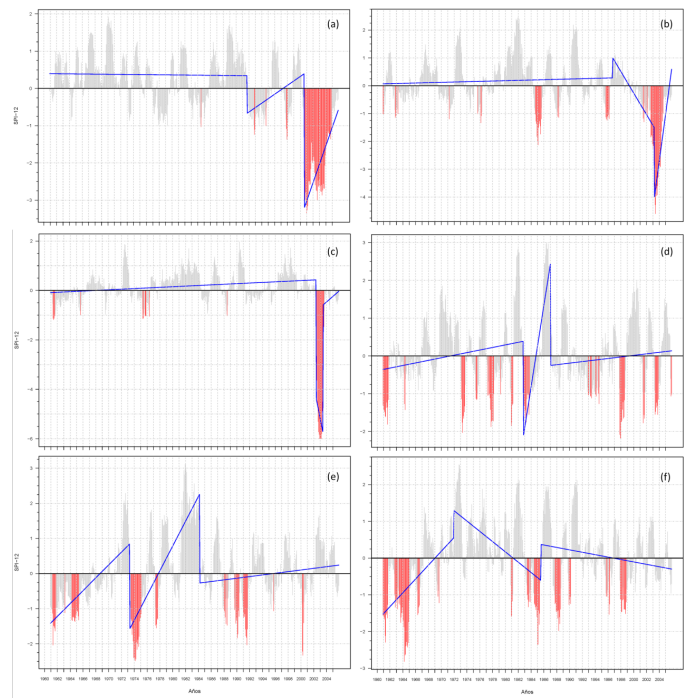
El embalse El Guamo se localiza en el estado Monagas sobre un tramo del río Guarapiche, relativamente cerca de San Antonio de Maturín. Cinco rachas secas sucedieron durante el periodo analizado: (i) 12/1972 a 11/1973 (duración: 12 meses; máxima intensidad: -2.21); (ii) 03/1975 a 06/1975 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.80); (iii) 11/1977 a 03/1978 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.98); (iv) 11/1980 a 03/1981 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.84); (v) 04/2003 a 10/2003 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -2.06). Como en el embalse Cumaripa, en la cuenca aportante de este embalse no se evidenció ningún punto de cambio en la serie SPI-12 de la estación de referencia (Figura 2e).

En el estado Sucre se encuentra el embalse Clavellinos, el cual almacena las aguas del río Cariaco para satisfacer parte de la demanda hídrica de Nueva Esparta y Sucre. La cuenca aportante al embalse estuvo expuesta a cinco eventos secos de importancia: (i) 01/1973 a 10/1973 (duración: 10 meses; máxima intensidad: -3.33); (ii) 10/1977 a 03/1978 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -2.16); (iii) 06/1978 a 11/1978 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -2.09); (iv) 06/2001 a 09/2001 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -2.11); (v) 11/2002 a 09/2003 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.32). La Figura 2f muestra dos inversiones abruptas ocurridas el 07/1972 y 02/2001 en la serie SPI-

12 de la estación de referencia.

El embalse Agua Viva está localizado en el estado Trujillo y almacena las aguas de un tramo del río Motatán. Su evidenció que dos sequías relevantes evolucionaron dentro de su cuenca de aportación para el periodo 1960-2005: (i) 09/2000 a 09/2001 (duración: 13 meses; máxima intensidad: -3.38); (ii) 11/2001 a 01/2004 (duración: 27 meses; máxima intensidad: -3.01). Una fuerte y rápida inversión desde condiciones predominantemente húmedas hacia severamente secas y persistentes ocurrió el 08/2000 (Figura 3a).

Figura 3. Series SPI-12 para el periodo 1960-2005 en las estaciones de referencia de los embalses: (a) Agua Viva; (b) Bocono-Tucupido; (c) Masparro; (d) Atarigua; (e) Yacambú; y (f) Dos Cerritos.



Fuente: calculos propios.

Nota: la línea azul indica la tendencia entre dos puntos de cambio. Las barras de color rojo muestra los meses en que $SPI-12 \leq -1.50$. Los puntos de cambios que se muestran son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

El embalse Bocono-Tucupido es una estructura hidráulica próxima a Guanare, estado Portuguesa (conocido también como embalse La Coromoto). Su cuenca aportante fue impactada por dos sequías severas: (i) 12/1984 a 03/1985 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -2.12); (ii) 09/2002 a 05/2004 (duración: 21 meses; máxima intensidad: -4.60). Desde el 09/1996, hasta finales del 2005, prevaleció una extrema y persistente sequedad (Figura 3b).

El embalse Masparro es la principal reserva de agua del estado Barinas. El análisis de la serie SPI-12 proveniente de la estación de referencia, reveló un único evento seco de importancia que persistió durante 14 meses, desde el 06/2002 hasta el 07/2003, alcanzado una intensidad máxima de -6.00. Antes de este evento, las rachas secas fueron esporádicas y mostraron una baja intensidad (Figura 3c).

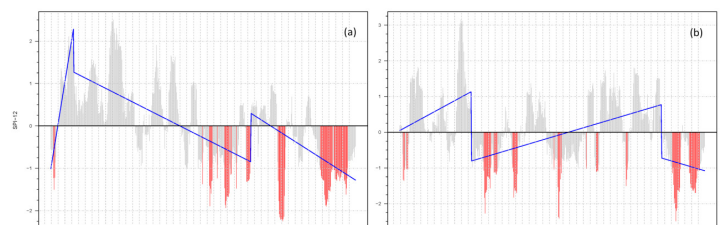
El embalse Atarigua fue construido en el año 1977 sobre el río Tocuyo (estado Lara). Entre 1960 y 2005 ocurrieron tres sequías severas en su cuenca aportante: (i) 04/1973 a 07/1973 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -2.03); (ii) 10/1977 a 02/1978 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.87); (iii) 11/1997 a 03/1998 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -2.21). Cabe destacar que el 10/1982 se observó una fuerte inversión en la tendencia del SPI-12, la cual se manifestó como un cambio abrupto en las condiciones climáticas dominantes sobre la cuenca aportante: húmeda a seca (Figura 3d).

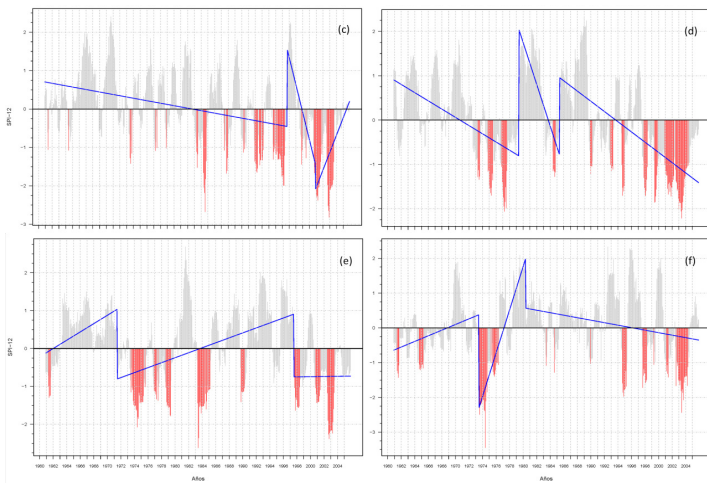
Al igual que el embalse Atarigua, el embalse Yacambú se localiza en el estado Lara sobre el río Tocuyo. La serie SPI-12 en la estación de referencia muestra la ocurrencia de dos sequías significativas: (i) 09/1973 a 10/1974 (duración: 14 meses; máxima intensidad: -2.49); (ii) 05/1991 a 09/1991 (duración: 5 meses; máxima intensidad:

-2.03). La inversión de tendencia más relevante en la serie SPI-12 se dio el 04/1973, justo antes del inicio de un fuerte episodio seco (Figura 3e). También el embalse Dos Cerritos se encuentra en el estado Lara y sobre el río Tocuyo. En este caso, dos rachas secas severas se identificaron en su cuenca aportante: (i) 12/1960 a 08/1961 (duración: 9 meses; máxima intensidad: -2.29); (ii) 02/1964 a 12/1964 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.82). La serie SPI-12 de la estación de referencia muestra dos puntos de cambio centrados en 12/1971 y 07/1985, este último coincidió con la finalización de una sequía (Figura 3f).

El embalse Tiznado, conocido localmente como embalse Río Verde, está localizado en el estado Guárico y es de gran importancia para el sector agrícola de la región, pues suple al sistema de riego homónimo. Desde 1960 a 2005 tres sequías severas impactaron su cuenca aportante: (i) 09/1986 a 04/1987 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -1.93); (ii) 08/1994 a 06/1995 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.24); (iii) 05/2001 a 03/2002 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -1.90). A partir de 06/1990 hasta el final del periodo analizado, se observó que los eventos secos fueron más frecuentes, intensos y persistentes (Figura 4a).

Figura 4. Series SPI-12 para el periodo 1960-2005 en las estaciones de referencia de los embalses: (a) Tiznado; (b) Guárico; (c) Taguaza; (d) Guanapito; (e) El Cigarrón; y (f) El Pueblito.





Fuente: calculos propios.

Nota: la línea azul indica la tendencia entre dos puntos de cambio. Las barras de color rojo muestra los meses en que $SPI-12 \leq -1.50$. Los puntos de cambios que se muestran son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%

Cerca de Calabozo (estado Guárico), también se encuentra el embalse Guárico, el cual embalsa el río homónimo y provee agua a una extensa región dedicada a la siembra de arroz bajo riego. La cuenca aportante a su vaso de almacenamiento estuvo expuesta a cinco episodios secos de importancia: (i) 06/1973 a 10/1973 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -2.27); (ii) 10/1977 a 03/1978 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -1.83); (iii) 04/1984 a 07/1984 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -2.41); (iv) 06/2001 a 04/2002 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.49); (v) 12/2003 a 08/2004 (duración: 9 meses; máxima intensidad: -1.70). La serie SPI-12 de la estación de referencia reveló la ocurrencia de dos puntos de cambio en la tendencia centrados en 06/1971 y 07/1999, aunque estas inversiones en las condiciones pluviométricas son graduales (Figura 4b).

El embalse Taguaza se localiza en el estado Miranda. Sus aguas abastecen los principales acueductos de Guarenas y Guatire. Cuatro sequías de importancia afectaron su cuenca aportante: (i) 05/1984 a 09/1984 (dura-

ción: 5 meses; máxima intensidad: -2.67); (ii) 11/1995 a 04/1996 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -2.00); (iii) 10/2000 a 08/2001 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.38); (iv) 09/2002 a 07/2003 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.82). La inspección visual del SPI-12 en la estación de referencia muestra que la cuenca aportante regularmente es afectada por fuertes eventos secos (Figura 4c).

En el estado Guárico, además de los embalses Tiznados y Guárico, se encuentran los embalses Guanapito, El Cigarrón y El Pueblito. El primero embalsa las aguas del río Orituco, mientras que los dos últimos, las aguas del río Unare, cerca de la ciudad Zaraza. El análisis de las series SPI-12 de sus cuencas aportantes mostró que aguas arriba del embalse Guanapito ocurrieron cinco sequías severas: (i) 02/1975 a 05/1975 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.70); (ii) 01/1977 a 07/1977 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -2.06); (iii) 12/1997 a 03/1998 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.71); (iv) 06/1999 a 09/1999 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.86); (v) 10/2002 a 10/2003 (duración: 13 meses; máxima intensidad: -2.22). Aunque se identificaron dos puntos de cambio (05/1979 y 05/1985), se notó que los periodos secos evolucionan gradualmente (Figura 4d).

En la cuenca aportante del embalse El Cigarrón también se identificaron cinco episodios secos de importancia: (i) 01/1974 a 08/1974 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -2.08); (ii) 01/1979 a 05/1979 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.78); (iii) 10/1983 a 04/1984 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -1.71); (iv) 02/1998 a 05/1998 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.56); (v) 08/2002 a 06/2003 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.38). Dos puntos de cambio fueron identificados, sin embargo, el centrado en 07/1997 coincidió con una inversión abrupta hacia

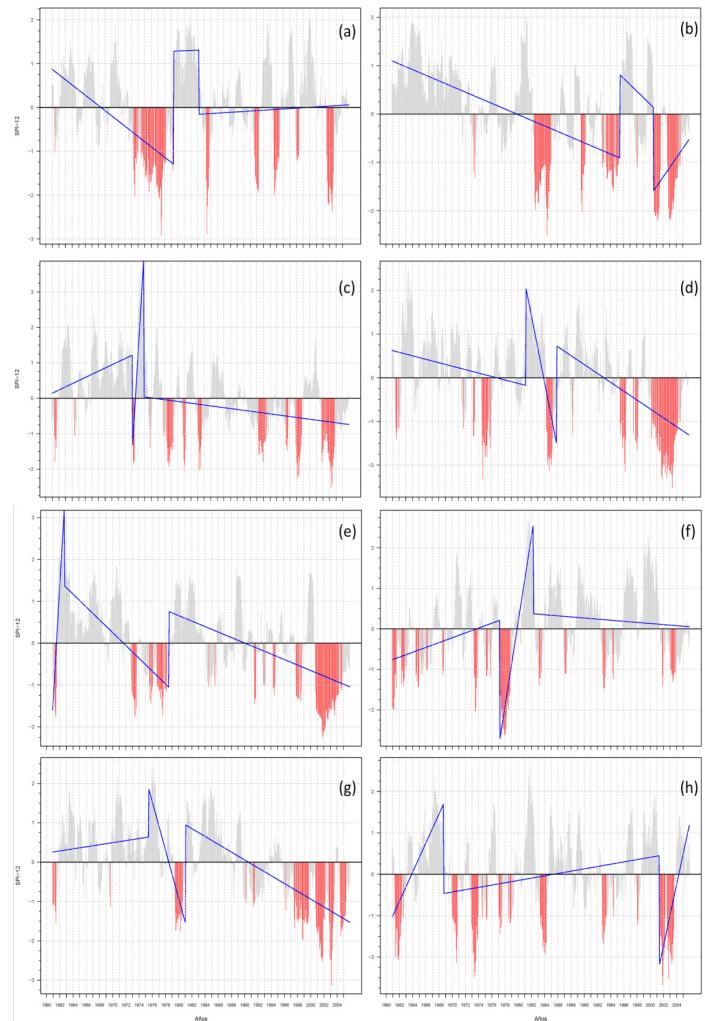
condiciones predominantemente seca (Figura 4e). Aguas arriba del embalse El Pueblito, solo tres sequías severas fueron observadas: (i) 07/1973 a 09/1974 (duración: 15 meses; máxima intensidad: -3.45); (ii) 09/1994 a 02/1995 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -1.97); (iii) 01/2003 a 10/2003 (duración: 10 meses; máxima intensidad: -2.44). El primero de estos eventos fue precedido por un punto de cambio abrupto (Figura 4f).

El embalse El Guapo se localiza en el estado Miranda. Sus aguas abastecen la ciudad Barlovento. Cinco sequías severas afectaron su cuenca aportante: (i) 09/1975 a 03/1976 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -1.92); (ii) 10/1976 a 09/1977 (duración: 12 meses; máxima intensidad: -2.92); (iii) 05/1984 a 09/1984 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -2.89); (iv) 10/1991 a 04/1992 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -1.94); (v) 09/2002 a 07/2003 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.37). La serie del SPI-12 en la cuenca aportante muestra que desde 03/1983 los episodios secos y húmedos se intercalan sin que ningún de ellos predomine sobre el otro (Figura 5a).

Sobre el río Unare se construyó el embalse La Estancia, del cual se abastece el acueducto de la ciudad Aragua de Barcelona (estado Anzoátegui). En su cuenca aportante se identificó la ocurrencia de cuatro sequías severas: (i) 08/1982 a 03/1983 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -1.98); (ii) 04/1984 a 10/1984 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -2.51); (iii) 09/2000 a 07/2001 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.22); (iv) 11/2002 a 10/2003 (duración: 12 meses; máxima intensidad: -2.19). En general, las sequías tendieron a intensificarse e incrementar su frecuencia durante el periodo 1960-2005 (Figura 5b).

Figura 5.

Serie SPI-12 para el periodo 1960-2005 en las estaciones de referencia de los embalses: (a) El Guapo; (b) La Estancia; (c) Onia; (d) Uribante-Caparo; (e) La Becerra; (f) Macagua II; (g) Las Majaguas; y (h) Gurí.



Fuente: calculos propios.

Nota: La línea azul indica la tendencia entre dos puntos de cambio. Las barras de color rojo muestra los meses en que $SPI-12 \leq -1.50$. Los puntos de cambios que se muestran son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%

El embalse Onia fue construido sobre el río homónimo en el estado Mérida. El análisis de la serie SPI-12 en su estación de referencia mostró tres eventos secos impor-

tantes: (i) 08/1978 a 11/1978 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.94); (ii) 01/1998 a 08/1998 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -2.28); (iii) 10/2002 a 09/2003 (duración: 12 meses; máxima intensidad: -2.54). Desde 11/1974 hasta el final del periodo analizado, la frecuencia de las rachas secas se incrementó ligeramente (Figura 5c).

El embalse Uribante, también conocido como embalse Uribante-Caparo, se encuentra localizado en el estado Táchira. Forma parte de la Central Hidroeléctrica Leonardo Ruíz Pineda. Se identificaron tres episodios secos que incidieron sobre su cuenca aportante: (i) 01/1975 a 05/1975 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.82); (ii) 07/1984 a 03/1985 (duración: 9 meses; máxima intensidad: -2.14); (iii) 09/2001 a 09/2003 (duración: 25 meses; máxima intensidad: -2.53). Un punto de cambio se detectó en 11/1985, a partir de este hito, se observó una clara tendencia hacia la recurrencia de rachas secas (Figura 5d).

El embalse La Becerra se encuentra próximo a la ciudad Zaraza, estado Guárico (sobre el río Ipire; tributario del río Unare). Tiene múltiples usos: irrigación, abastecimiento de agua potable y control de crecientes. En su cuenca de aportación solo se registró una sequía relevante desde 11/2000 hasta 03/2003, cuya intensidad máxima fue igual a -2.25 (duración: 29 meses). En 07/1978 se dio un punto de cambio que coincidió con el incremento en la frecuencia de episodios secos (Figura 5e).

El embalse Macagua II, también conocido como Antonio José de Sucre, se localiza aguas abajo de los embalses Gurí y Caruachi (río Caroní). Se destina primordialmente a generación hidroeléctrica. Su estación de referencia se localiza en la ciudad Upata; por tanto, fue-

ra de la cuenca aportante al embalse Gurí. Dos eventos secos de importancia fueron observados: (i) 12/1960 a 04/1961 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.99); (ii) 04/1977 a 10/1978 (duración: 19 meses; máxima intensidad: -2.68). Destaca un punto de cambio abrupto en 03/1977, el cual precedió una fuerte sequía (Figura 5f).

En cuanto al embalse Gurí, es ampliamente conocido por ser la estructura hidráulica de mayor tamaño del país y proveer gran parte de su energía hidroeléctrica. Durante el periodo 1960-2005 se registraron cinco eventos secos relevantes en la cuenca alta del río Caroní (Kavanayen): (i) 10/1961 a 02/1962 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -2.07); (ii) 03/1973 a 08/1973 (duración: 6 meses; máxima intensidad: -2.48); (iii) 10/1983 a 04/1984 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -1.93); (iv) 09/2001 a 03/2002 (duración: 7 meses; máxima intensidad: -2.67); (v) 09/2002 a 07/2003 (duración: 11 meses; máxima intensidad: -2.51). Cabe destacar que la sequía del año 2001 coincidió con una fuerte inversión en la serie SPI-12 de la estación Kavanayen (Figura 5h).

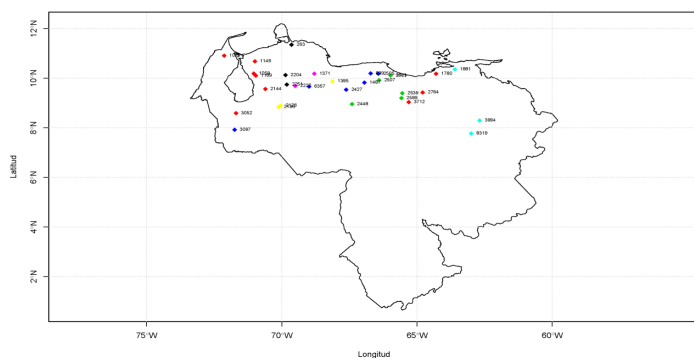
El embalse Las Majaguas embalsa las aguas del río Cojedes en el estado Portuguesa (en las afueras de San Rafael de Onoto). El análisis de la serie SPI-12 en la estación de referencia (Los Cogollos), muestra que en la parte alta de su cuenca aportante han ocurrido cuatro eventos secos de importancia: (i) 05/1999 a 08/1999 (duración: 4 meses; máxima intensidad: -1.99); (ii) 11/2000 a 11/2001 (duración: 13 meses; máxima intensidad: -2.51); (iii) 11/2002 a 06/2003 (duración: 8 meses; máxima intensidad: -3.12); (iv) 08/2004 a 12/2004 (duración: 5 meses; máxima intensidad: -1.88). Desde 01/1981 las condiciones climáticas secas tendieron a ser más frecuentes (Figura 5g).

Casi la totalidad de las cuencas aportantes a los embalses analizados han presentado episodios secos. Algunos de estos evolucionaron progresivamente a lo largo del tiempo, como los observados en el embalse Guárico. Otros fueron precedidos por una fuerte y rápida inversión desde condiciones climáticas predominantemente húmedas a severamente secas (ej., Atarigua). Mientras que en unos pocos casos, las sequías se caracterizaron por su baja intensidad y duración (ej., El Guamo). Para facilitar el análisis global de resultados descritos previamente, se agruparon los embalses según la similitud de las series SPI-12 en sus estaciones de referencias. En la siguiente sección se presentan y discuten los resultados más relevantes derivados de dicha agrupación.

Cuencas aportantes homogéneas según la serie SPI-12 en la estación de referencia

La Figura 6 muestra la ubicación espacial de los embalses listados en la Tabla 1, agrupados en regiones cuyas series SPI-12 en sus cuencas aportantes son similares.

Figura 6. Distribución espacial de los embalses analizados agrupados por series del SPI-12 homogéneas en las estaciones de referencia durante el periodo 1960-2005.



Fuente: calculos propios.

Nota: El número indica el serial de la estación de referencia asociada al embalse (ver Tabla 2). Los grupos ho-

mogéneos según las series SPI-12 en sus cuencas aportantes se representan con un mismo color

Nota 2: G1 (color negro): 263, 2204 y 2251; G2 (color rojo): 1019, 1059, 1149, 1169, 1780, 2144, 2764, 3052 y 3712; G3 (color verde): 2448, 2507, 2539, 2589 y 2601; G4 (color azul): 589, 1487, 2427, 2505, 3097 y 6357; G5 (color cian): 1873, 1881, 3994 y 8319; G6 (color magenta): 1371 y 2227; G7 (color amarillo): 1395, 2176 y 2196

La Tabla 2 muestra las coordenadas geográficas donde se ubica cada embalse y el grupo homogéneo de pertenencia.

Tabla 2.- Embalses analizados agrupados por series del SPI-12 homogéneas en las estaciones de referencia durante el periodo 1960-2005.

Nombre del embalse	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Región de pertenencia
El Isiro	-69.64	11.35	G1
Lagartijo	-66.72	10.19	G4
Tule	-72.13	10.91	G2
Pueblo Viejo	-71.04	10.18	G2
Maticora	-71.00	10.68	G2
Machango	-70.97	10.10	G2
Cumaripa	-68.80	10.18	G6
Pao-Cachinche	-68.13	9.87	G7
Camatagua	-66.95	9.82	G4
Turimiquere	-64.30	10.18	G2
El Guamo	-65.98	10.11	G5
Clavellinos	-63.60	10.35	G5
Agua Viva	-70.61	9.56	G2
Bocono-Tucupido	-70.04	8.90	G7
Masparro	-70.11	8.84	G7
Atarigua	-69.87	10.12	G1
Yacambu	-69.51	9.69	G6
Dos Cerritos	-69.82	9.74	G1
Tiznado	-67.62	9.53	G4
Guarico	-67.40	8.95	G3
Taguaza	-66.43	10.18	G4

Guanapito	-66.40	9.92	G3
El Cigarrón	-65.55	9.39	G3
El Pueblito	-65.58	9.20	G3
El Guapo	-65.98	10.11	G3
La Estancia	-64.79	9.42	G2
Onia	-71.69	8.58	G2
Uribante Caparo	-71.75	7.92	G4
La Becerra	-65.31	9.03	G2
Macagua II	-62.69	8.29	G5
Las Majaguas	-68.99	9.66	G4
Guri	-63.00	7.77	G5

Fuente: calculos propios.

Los embalses El Isiro, Atarigua y Dos Cerritos conforman el grupo G1. Sus cuencas aportantes se localizan al noroeste del país. Las sequías en esta región mostraron una marcada sincronización temporal en cuanto al inicio, duración, finalización e intensidad (Figuras 1a, 3d y 3f). El grupo G2, al igual que el grupo G1, fue afectado por sequías sincronizadas en el dominio temporal, aunque en el contexto geográfico se distinguen dos subgrupos; el primero localizado en la depresión del Lago de Maracaibo, y el segundo en la porción este de la depresión de Unare.

La comparación de las series SPI-12 vinculadas a cada grupo homogéneo, reveló una clara sincronización temporal entre los eventos secos. Esto quiere decir que las sequías que incidieron en las cuencas aportantes analizadas durante el periodo 1960-2005, afectaron simultáneamente varios embalses. Otra característica, menos evidente, es que desde finales de los años 90 hasta finales del 2005, la sincronización de los eventos secos entre los miembros de los grupos homogéneos G1 y G6 se pierde momentáneamente. Por el contrario, este efecto se fortaleció en los grupos homogéneos G2, G3, G4, G5 y G7.

En general, los resultados muestran que las sequías hidrológicas que tienen incidencia sobre las reservas hídricas de los principales embalses situados en Venezuela presentan un patrón espacio-temporal moderadamente bien definido. Este hallazgo es consistente con los estudios realizados por Paredes y Guevara (2010), Paredes y Guevara (2013) y Paredes et al. (2014), quienes advirtieron un patrón subyacente en la distribución de las sequías meteorológicas sobre Los Llanos venezolanos.

En efecto, los eventos secos de baja frecuencia que evolucionaron sobre las cuencas aportantes presentan una alta variabilidad temporal, pero su influencia geográfica está muy bien definida. Así, por ejemplo, las sequías que afectaron el embalse Pao-Cachinche también impactaron los embalses Bocono-Tucupido y Masparro. Esta característica resulta notable en materia de gestión de recursos hídricos, pues sugiere la presencia de grupos de embalses que muestran un nivel de exposición similar a las sequías severas.

Estudios previos han sugerido que la fase cálida del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), conocida ampliamente como El Niño, se asocia con una persistente sequedad en gran parte del territorio venezolano (Corporación Andina de Fomento, 2000; Guevara-Bello et al., 2010; Paredes y Guevara, 2010). Sobre este aspecto, cabe destacar que entre 1960 y 2006 ocurrieron dos eventos El Niño muy fuertes: 1982/83 y 1997/98 (Xu, Wang, Ma y Xu, 2009).

Curiosamente, el episodio 1982/83 no se reflejó por una sequía intensa en los embalses agrupados por G4, G6 y G7 (ver Figuras 1 a 5). Una respuesta similar se notó en G7 durante el episodio 1997/98 (embalses: Pao-Cachinche, Bocono-Tucupido y Masparro). Esto implica

que las sequías hidrológicas en las cuencas aportantes analizadas no pueden atribuirse solo al fenómeno oceánico-atmosférico El Niño, indicando que otros mecanismos físicos desencadenaron algunas de las rachas seca previamente analizadas.

Recientemente, Tim y de Guenni (2015) encontraron suficiente evidencia observacional para afirmar que el calor almacenado por las aguas superficiales en la región Atlántico Norte juega un rol clave en la variabilidad anual y estacional de las lluvias sobre el territorio venezolano, y por tanto puede promover prolongadas sequías sobre Venezuela, sin necesidad de coincidir con condiciones El Niño en el Océano Pacífico Tropical. Esto no resulta sorprendente, si se toma en cuenta que la Zona de Convergencia Inter-Tropical es el principal mecanismo físico modulador de las lluvias en Venezuela (Pulwarty et al., 1992), gran parte del Caribe (Hastenrath, 1984) y nordeste de Brasil (Paredes et al., 2015).

Conclusiones

Se analizó la incidencia de las sequías hidrológicas en 32 grandes embalses ubicados en el territorio venezolano durante el periodo 1960-2005. En cada embalse, una estación pluviométrica ubicada aguas arriba del vaso de almacenamiento fue cuidadosamente seleccionada. Sus registros de precipitación mensual fueron transformados al índice de precipitación estandarizado empleando una escala temporal de 12 meses (SPI-12); seguido, las series temporales del SPI-12 fueron agrupadas aplicando un análisis de conglomerado jerárquico. De esta forma, el patrón espacio-temporal que estructuró el SPI-12 sobre las cuencas aportantes fue identificado. La distribución espacial de este patrón permitió explicar la manera cómo las sequías afectaron el volumen de reservas hídricas almacenadas en ciertos embalses.

Las sequías sobre las cuencas aportantes muestran una alta variabilidad estacional e interanual; sin embargo, estos eventos presentan características muy similares al considerar ciertos grupos de embalses (ej., inicio, intensidad, finalización y duración). Por tanto, los miembros de estos grupos pueden considerarse homogéneos con base al grado de exposición a las sequías.

Desde el año 2000 las sequías han afectado severamente los sectores hídrico, agrícola e hidroeléctrico en Venezuela. La evidencia observacional disponible para el periodo 1960-2005, sugiere que las cuencas aportantes a los grandes embalses están expuestas a sequías recurrentes con diferentes grados de intensidad y persistencia. Esta situación hace suponer que los sectores más vulnerables a estos eventos (en especial, el agrícola e hidroeléctrico) probablemente no han desarrollado políticas adecuadas de adaptación a la variabilidad climática del entorno donde llevan a cabo sus actividades. En todo caso, dicha hipótesis debe ser evaluada en la medida que se disponga de nueva información pluviométrica en las cuencas aportantes.

Reconocimiento

Este estudio fue financiado por CAPES (26001012005P5 PNPD-UFAL/Meteorología, Brasil) y CAPES/CEMADEN/MTCI (projeto Análise e Previsão dos Fenômenos Hidrometeorológicos Intensos do Leste do Nordeste Brasileiro, Brasil), y contó con la participación del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (Venezuela) y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Los Llanos Ezequiel Zamora (Cojedes, Venezuela).

Referencias bibliográficas

- Ayala-Carcedo, F. y Cantos J. (2002). Riesgos naturales. DF, México: Grupo Planeta.
- Blunden, J. y Arndt, D. S. (2015). "State of the Climate in 2014". Bulletin of the American Meteorological Society. 96(7), ES1-ES32.
- Carrillo, J. S. (1992). Las sequías en Venezuela. Caracas, Venezuela: CDCH-UCV.
- Charvériat, C. (2000). Natural disasters in Latin America and the Caribbean: An overview of risk. Washington, EEUU: Inter-American Development Bank.
- Chassaigne-Ricciulli, A.; Barrientos-Acosta, V. y Hernández-Jiménez, A. (2012) "Obtención de una población de maíz para tolerancia a factores adversos en tres estados de Venezuela". Bioagro. 24(3), 221-226.
- Colotti, E.; Cedeño, M. y Montañez, C. (2013). "La sequía meteorológica y la variación de la superficie agrícola en la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela período 1972-2004". Terra Nueva Etapa. 29(45), 11-53.
- CORPOELEC. 2016. Procesos medulares: generación. [Portal en línea]. En <http://www.corpoelec.gov.ve/generación>. [Consulta: enero 15, 2016].
- Corporación Andina de Fomento (2000). Las lecciones de El Niño. Memorias del Fenómeno El Niño 1997-1998. Retos y propuestas para la región andina. Volumen 4: Venezuela. Caracas, Venezuela: Corporación Andina de Fomento.
- Dahal, P.; Shrestha, N. S.; Shrestha, M. L.; Krakauer, N. Y.; Panthi, J.; Pradhanang, S. M. y Lakhankar T. (2016). "Drought risk assessment in central Nepal: temporal and spatial analysis". Natural Hazards. 80(3), 1913-1932.
- Delgado, A. y Castillo, R. (2011). "Fuentes de riesgo para el cultivo del arroz en el estado Portuguesa, Venezuela". Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología. 29, 1-11.
- Encalada, A. (1994). Evaluación ambiental en proyectos de presas y embalses. Quito, Ecuador: Fundación Natura.
- Everitt, B. S.; Landau, S.; Leese, M. y Stahl, D. (2011). Cluster Analysis. New York, USA: John Wiley & Sons.
- FEDEAGRO. 2015. Estadísticas Agropecuarias: producción agropecuaria. [Portal en línea]. En <http://www.fedeagro.org/produccion/default.asp>. [Consulta: enero 15, 2016].
- Garrido, A. y Shechter, M. (2014). Water scarcity in Latin America and the Caribbean: Myths and reality. Water for Americas: Challenges and Opportunities. London, UK: Routledge.
- Guenni, L.; Degryze, E. y Alvarado, K. (2008). "Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela". Revista Colombiana de Estadística. 31(1), 41-65.
- Guevara-Belloa, J. E.; Vega-González, C. E. y Guevara-Pérez, E. (2010). "Análisis estocástico de una serie cronológica de caudales mensuales. Caso de estudio: Río Caroní, Venezuela". Ingeniería UC. 17(1), 46-54.
- Hastenrath, S. (1984). "Interannual variability and

- annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector". *Monthly Weather Review*. 112(6), 1097-1107.
- Hernández, R. (2008). Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos. Tesis inédita de maestría, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Caracas.
- Instituto Internacional del Manejo de Agua (2000). El manejo de los recursos hídricos en Venezuela. Austin, EEUU: Universidad de Texas.
- Lehner, B.; Reidy Liermann, C.; Revenga, C.; Vörösmarty, C.; Fekete, B.; Crouzet, P.; Döll, P.; Endejan, M.; Frenken, K.; Magome, J.; Nilsson, C.; Robertson, J.; Rödel, R.; Sindorf, N. y Wisser, D. (2011). "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management". *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9(9), 494-502.
- Marmol, J. F. (1994). "Consideraciones para la selección y manejo de especies tolerantes a la sequía". *Revista de la Facultad de Agronomía*. 11(2), 164-173.
- Martelo, M. (2002). Influencia de las variables macroclimáticas en el clima de Venezuela. Maracay: Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela (inédito).
- McKee, T. B.; Doesken, N. J. y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA, USA: American Meteorological Society.
- Mendoza, N., y Puche, M. (2014). "Evaluación de la ocurrencia de sequía en localidades de Venezuela". *Revista de la Facultad de Agronomía*. 24(4), 661-678.
- Nalbantis, I. y Tsakiris, G. (2009). "Assessment of hydrological drought revisited". *Water Resources Management*. 23(5), 881-897.
- Núñez, J. H.; Verbist, K.; Wallis, J. R.; Schaefer, M. G.; Morales, L. y Cornelis, W. M. (2011). "Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile". *Journal of Hydrology*. 405(3), 352-366.
- Organización Meteorológica Mundial (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros*. Génova, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Paredes, F. J. y Guevara, E. (2013). "A probabilistic model for the prediction of meteorological droughts in Venezuela". *Atmósfera*. 26(3), 311-323.
- Paredes, F. J.; Alvez, H. B. y Guevara, E. (2015). "Análisis espacial y temporal de las sequías en el nordeste de Brasil". *Agriscientia*. 32(1), 1-14.
- Paredes, F. y Guevara, E. (2010). "Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en Los Llanos de Venezuela". *Bioagro*, 22(1), 3-10.
- Paredes, F.; La Cruz, F. y Guevara, E. (2014). "Regional frequency analysis of meteorological droughts

- in the largest cereals producing region of Venezuela". *Bioagro*. 26(1), 21-28.
- Paredes, F.; Millano, J. y Guevara, E. (2008). "Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996". *Revista de Climatología*. 8, 15-27.
- Penalba, O. C. y Rivera, J. A. (2016). "Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences". *Advances in Geosciences*. 41, 1-14. DOI: 10.5194/adgeo-42-1-2016.
- Pitman, W. D. y Sotomayor-Rios, A. (2000). *Tropical forage plants: development and use*. Washington, EEUU: CRC Press.
- Poveda, G. y Mesa, O. J. (1997). "Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena". *Journal of Climate*. 10(10), 2690-2702.
- Poveda, G.; Waylen, P. R. y Pulwarty, R. S. (2006). "Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 234(1), 3-27.
- Pulwarty, R. S.; Barry, R. G. y Riehl, H. (1992). "Annual and Seasonal Patterns of Rainfall Variability over Venezuela". *Erdkunde*. 46, 273-289.
- Quiroz, I. y Paredes, F. (2015). "Características espaciales y temporales de las sequías en el estado Cojedes durante el período 1950-2005". *Agrollanía*. 12, 56-60.
- Rótolo, G.; Francis, C. y Ulgiati S. (2011). *Rainfed Agroecosystems in South America*. En Ph. Tow, I. Cooper, I. Partridge y C. Birch (Eds.), *Rainfed Farming Systems*. (pp. 561-601). Netherlands: Springer.
- Shukla, S. y Wood, A. W. (2008). "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought". *Geophysical Research Letters*, 35(2). DOI: 10.1029/2007GL032487
- Soto, M. L.; Florio, J.; Tremont, O.; Fuenmayor, A.; Pérez, N.; Sánchez, E. (2009). "Caracterización forrajera y uso de la tierra en fincas doble propósito en Barinas, Venezuela". *Multiciencias*. 9(2), 126-132.
- Tim, N. y de Guenni, L. B. (2015). "Oceanic influence on the precipitation in Venezuela under current and future climate". *Climate Dynamics*, 1-24.
- Tim, N. y De Guenni, L. B. (2015). "Oceanic influence on the precipitation in Venezuela under current and future climate". *Climate Dynamics* (on line), 1-24. DOI: 10.1007/s00382-015-2832-6.
- Torgo, L. (2003). *Data Mining with R: learning by case studies*. Florida, EEUU: Chapman & Hall/CRC.
- Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Newnham, G. y Culvenor, D. (2010). "Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series". *Remote sensing of Environment*. 114(1), 106-115.
- Vicario, L.; García, C. M.; Teich, I.; Bertoni, J. C.; Ravelo, A. y Rodríguez, A. (2015). "Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina". *Tecnología y Ciencias del Agua*. 6(1), 153-165.

Wilhite, D. A. (2012). *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies: Theory and Case Studies (Vol. 2)*. New York, USA: Springer Science & Business Media.

Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). "Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions". *Water international*. 10(3), 111-120.

Xu, W. C.; Wang, W.; Ma, J. S. y Xu, D. Y. (2009). "ENSO events during 1951–2007 and their characteristic indices". *Journal of Natural Disasters*. 18, 18-24.