

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN LA PRINCIPAL REGIÓN CEREALERA DE VENEZUELA

Franklin Paredes¹, Freddy La Cruz¹ y Edilberto Guevara²

RESUMEN

La principal región productora de cereales del territorio venezolano, ubicada en la región llanera, es impactada sucesivamente por sequías meteorológicas, lo que ocasiona pérdidas económicas y disminuye la producción de este rubro para abastecer el mercado nacional. Dada esta problemática, en esta investigación se realizó un análisis regional de frecuencia de las sequías meteorológicas en los estados Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa y Guárico como unidad de estudio (UE), que contempló inicialmente la identificación de las regiones homogéneas según la distribución de frecuencia de la precipitación anual en la UE, luego la determinación de la curva de crecimiento en las regiones homogéneas de la UE, para finalmente realizar el mapeado del periodo de retorno de eventos anuales secos en la UE. Entre los resultados más relevantes se destaca que la UE presenta seis regiones homogéneas en cuanto a la distribución de la precipitación media anual, la función de distribución de probabilidad que mejor ajusta a la precipitación anual en la UE es la Generalizada Normal, seguida por la de Pearson tipo III, y que las cuencas de los ríos Unare y Manzanares (norte de Anzoátegui) y el eje San Juan-Guanipa (noreste de Anzoátegui), la cuenca del río Manapire (Guárico) y la Mesa de Morichal Largo (sur de Anzoátegui) tienen el mayor riesgo de ocurrencia de años secos.

Palabras clave adicionales: Eventos meteorológicos, Llanos de Venezuela, mapeado, precipitación

ABSTRACT

Regional frequency analysis of meteorological droughts in the largest cereals producing region of Venezuela

Los Llanos represents the main cereal producing region in Venezuela, but the region is usually affected by some extreme droughts. Droughts cause great economic losses and affect grain production, thus preventing adequate supply to the domestic market. The objective of this study was to perform a regional frequency analysis to estimate the return period of extreme droughts at Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa, and Guárico States as the study unit (SU). It included identification of homogeneous regions according to the frequency distribution of the annual precipitation at the SU, determination of the regional growth curve in the homogeneous regions, and mapping of the return period of extreme dry years in the SU. It was found that the SU has six homogeneous sub-regions according to the distribution of annual rainfall; the probability distribution function that best fits the annual rainfall records in the SU is the Generalized Normal, followed by the Pearson type III; the watershed of rivers Unare and Manzanares (northern Anzoátegui) and the geographical axis San Juan-Guanipa (northeastern Anzoátegui), the watershed of river Manapire (Guárico) and the plains "Morichal Largo" (southern Anzoátegui) have the highest risk of occurrence of dry years.

Additional key words: Meteorological events, Venezuelan Llanos, mapping, rainfall

INTRODUCCIÓN

La sequía es una condición natural caracterizada por una deficiencia en la ocurrencia de precipitaciones respecto a su valor histórico normal. Según el medio afectado y la duración de la carencia de lluvias se distinguen tres tipos de sequías en orden de ocurrencia: meteorológica, agrícola e hidrológica (OMM, 2006). Las sequías

causan serios estragos en el sector agrícola venezolano, especialmente sobre los cereales cultivados en secano (arroz, maíz y sorgo), los cuales dependen de la ocurrencia de lluvias. Estos cultivos se siembran intensamente en las planicies de los estados Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa y Guárico. Se ha señalado que en algunos años la producción de cereales ha disminuido hasta en 50 % debido, en parte, a las lluvias deficitarias. Ante

Recibido: Mayo 23, 2013

Aceptado: Diciembre 23, 2013

¹ Grupo para Investigaciones sobre Cuencas Hidrográficas y Recursos Hidráulicos, Programa Ingeniería. UNELLEZ-VIPI. San Carlos. Venezuela. e-mail: franklinparedes75@gmail.com ; freddyjoselacruz@hotmail.com

² Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela. e-mail: eguevara@uc.edu.ve

este contexto, el análisis de recurrencia de años secos es pertinente en materia de planificación agrícola e hidrológica.

Existen varios métodos para caracterizar los eventos de sequías (Keyantash y Dracup, 2002). Los de mayor uso en el ámbito agrícola se apoyan en índices cuantitativos que miden el grado de desviación de los registros, acumulados o individuales, con relación a un valor considerado normal (Heim, 2002). A partir de estos índices se calcula la duración, la frecuencia, la velocidad de implantación y el espaciado temporal de los episodios secos (Mendoza y Puche, 2007). El análisis regional de frecuencia basado en L-momentos (ARF-LM) es una técnica desarrollada por Hosking y Wallis (1997) para caracterizar, bajo un enfoque probabilístico, eventos extremos. Aunque es muy robusta, pocas veces se ha usado en Sudamérica (UNESCO, 2010). El ARF-LM centra su atención en la estimación del periodo de recurrencia de eventos extremos (excedencia o no excedencia) a partir de una función de distribución de probabilidad (FDP) que ajusta satisfactoriamente los registros estandarizados de una variable agroclimática dentro de una unidad geográfica cuyas series temporales locales son ajustadas por la misma FDP (Álvarez et al., 1999). En Sudamérica, la contribución más significativa en materia de ARF-LM la realizaron Núñez et al. (2011), quienes mapearon la probabilidad de recurrencia de años secos en una región árida del nor-centro de Chile con resultados satisfactorios. Por su parte, el Programa Hidrológico Internacional de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO publicó una guía metodológica para la aplicación del ARF-LM con el software comercial L-RAP de la empresa MGS Software (UNESCO, 2010).

El ARF-LM requiere de la aplicación de tres etapas secuenciales: 1) Identificación de subregiones homogéneas en donde se agrupan las estaciones en subregiones presuntamente homogéneas usando algún criterio fisiográfico, climático y/o estadístico. La homogeneidad de las subregiones se verifica con una medida de heterogeneidad (H1), y las estaciones que elevan el H1 se identifican con la medida de discordancia llamada D_i ; 2) Selección de la distribución de frecuencia, donde se evalúa el grado de ajuste de varias FDP a los registros estandarizados de cada subregión homogénea; 3) Estimación de cuantiles, mediante el cálculo en cada estación de una

subregión homogénea de los primeros L-momentos, los cuales se adimensionan, dividiéndolos por la media de serie, y luego se usan para determinar los valores regionales, y los parámetros de posición, escala y forma de la FDP regional. A partir de esta última se genera la curva de crecimiento, la cual muestra la variación de los cuantiles de la FDP en función de la fracción, precipitación media de una estación versus la precipitación media de la región. Una cuarta etapa fue propuesta por Núñez et al. (2011), quienes plantearon el empleo de funciones matemáticas en cada subregión homogénea, que relacionen los L-momentos con la precipitación media anual. Estas funciones permiten estimar los L-momentos en los sitios donde sólo se conoce la precipitación media anual, es decir, es posible mapear el periodo de recurrencia de un evento con solamente contar con un mapa de precipitación media de la región.

Las zonas de cultivos de secano situadas en los estados Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa y Guárico (región productora de cereales) son altamente vulnerables a la ocurrencia de años secos, por tanto conocer el periodo de recurrencia de estos eventos es de gran importancia para quienes toman decisiones en materia de planificación agrícola e hidrológica. El objetivo de este estudio es mostrar los resultados más importantes derivados de un ARF-LM aplicado a la precipitación anual en los estados Anzoátegui, Cojedes, Portuguesa y Guárico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La unidad de estudio (UE) cubrió 138.286 km² de los estados Anzoátegui, Cojedes, Guárico y Portuguesa en los llanos venezolanos, y los registros pluviométricos de las estaciones utilizadas fueron tomados del portal Web del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) en <http://www.inameh.gob.ve>. La investigación contempló las siguientes cinco fases:

Fase I. Análisis preliminar de las series disponibles que consistió en los siguientes pasos: 1) Se seleccionaron 152 estaciones dentro de la UE, con longitudes de registro mayor o igual a 15 años discontinuos, entre 1921 y 2005 (pocas estaciones extendían sus registros para años posteriores); 2) En cada estación, se calculó la serie de precipitación anual (SPA), o sea, la suma

de la precipitación mensual en un año. A la SPA se le calculó la media, coeficiente de variación, valor mínimo, valor máximo, media, mediana, moda, asimetría y curtosis; 3) A la SPA en cada estación se le aplicó un análisis de estacionariedad para identificar tendencias durante el periodo de análisis (prueba de t a la pendiente de la recta), un examen de autocorrelación serial para detectar años autocorrelacionados (prueba de Durbin-Watson), y un análisis de homogeneidad para identificar años no homogéneos (prueba de homogeneidad de Easterling et al., 1996).

Fase II. Identificación de regiones homogéneas: 1) Las SPA estacionarias, sin autocorrelación y homogéneas conformaron una super-región heterogénea, y se calculó el H1 de la super-región y la D_i de cada serie; 2) Se aplicó un análisis de conglomerado jerárquico a las SPA, empleando el algoritmo de Ward y la distancia euclidiana (Pérez, 2004). Las variables de agrupamiento fueron la latitud y longitud, altitud, D_i y precipitación media anual (PMA). El número definitivo de conglomerados se seleccionó evaluando el grado de segregación de cada configuración en un dendograma (se probaron configuraciones de 16, 12, 10, 8 y 6 conglomerados); 3) Cada estación se asoció a un conglomerado (según los resultados del análisis precedente), conformando así, subregiones homogéneas candidatas. Se usó el algoritmo RSARFLM V.3 de Núñez (2011), para calcular el H1 de cada subregión homogénea candidata y la D_i de las SPA asociadas a las estaciones incluidas en la subregión. Este proceso fue iterativo y culminó cuando en cada subregión homogénea H1 fue menor o igual a 3 y ninguna de sus estaciones tuvo una SPA discordante (Wallis et al., 2007).

Fase III. Selección de la FDP: 1) Se calculó el estadístico Z^{DIST} en cada subregión homogénea, como se explica en Hosking y Wallis (1997) y se probó el ajuste a las FDP: generalizada logística (GLO), generalizada de valor extremo (GEV), generalizada normal (GNO), Pearson Tipo III (PE3) y Pareto generalizada (GPO); 2) Se calcularon los parámetros de la FDP con mejor ajuste: parámetro de posición, parámetro de escala y parámetro de forma, usando las relaciones lineales referidas por Hosking y Wallis (1997).

Fase IV. Estimación de cuantiles y generación de curva de crecimiento regional: A partir de la FDP seleccionada en cada subregión homogénea, se

generó la curva de crecimiento.

Fase V. Mapeado de eventos anuales secos en la UE: 1) Se usó como modelo la FDP común de mejor ajuste en la UE y se estimaron los L-momentos normalizados en la UE usando un mapa grillado de la PMA como variable auxiliar. La PMA y los L-momentos normalizados se relacionaron como se detalla en Núñez et al. (2011); 2) Se mapeó el periodo de recurrencia para determinado año en función de la relación entre la precipitación y la PMA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación Anual en la UE

La PMA en la UE varió de 368 mm anuales en la franja costera y región norcentral del estado Anzoátegui a más de 1 770 mm anuales en la vertiente oriental de la Cordillera de Los Andes; en esta última, concentrada al noroeste del estado Portuguesa. La asimetría y la curtosis de la PMA en las estaciones evaluadas no presentaron un patrón espacial definido. Se encontró una relación 5 a 14, de número de estaciones con asimetría positiva versus asimetría negativa, sugiriendo que los años húmedos son menos frecuentes que los años secos. En cuanto a la curtosis, 56 % de las estaciones mostraron una curtosis positiva, indicando que no existe un predominio de estaciones, cuyos valores de precipitación anual tiendan a concentrarse en torno a la PMA.

Subregiones homogéneas identificadas en la UE

La super-región presentó un H1 de 11,86 y $0,065 \leq D_i \leq 14,14$. Se identificaron seis subregiones homogéneas dentro de la super-región heterogénea (Figura 1, Cuadro 1). La región 1 agrupa las estaciones con los menores valores de PMA y se ubica al fondo de la depresión del río Unare; la región 2 cubre el centro de los estados Anzoátegui y Guárico; la región 3 es geográficamente discontinua y forma conglomerados de escasa cobertura al noreste de Anzoátegui y norte de Guárico y Cojedes; la región 4 es la más húmeda de la UE y está en la cuenca alta del río Boconó en el estado Portuguesa; la región 5 tiene zonas con media y baja altitud en la cuenca del río Portuguesa en Cojedes, el estado Portuguesa y la cuenca del río Tiznado en Guárico; la región 6 cubre las planicies de los ríos Guariquito, Manapire, Zuata, Pao y Caris al sur de Guárico y Anzoátegui.

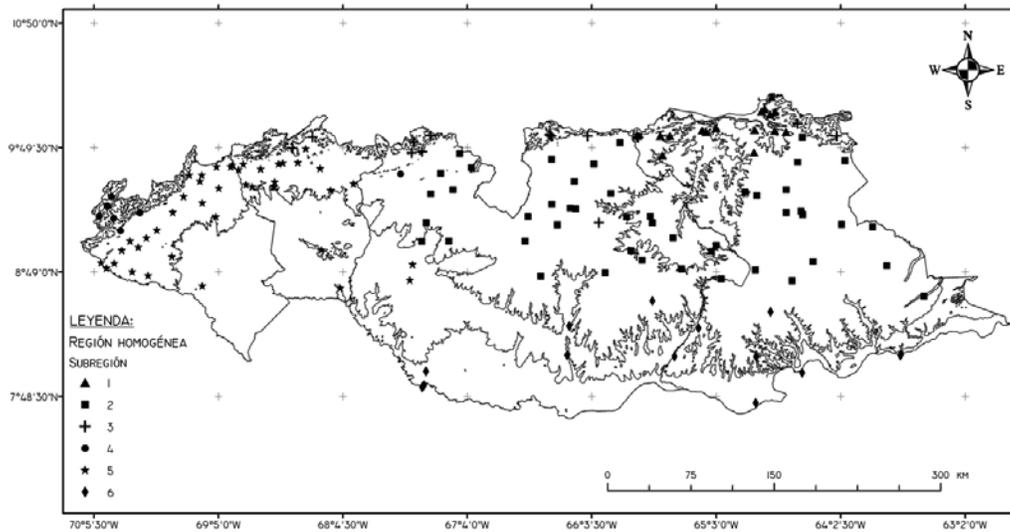


Figura 1. Categorización de las estaciones según la subregión homogénea de pertenencia. Se muestran curvas de nivel que permiten diferenciar las zonas planas de las montañosas

Cuadro 1. Principales características de las subregiones homogéneas en la UE

Subregión	Número de estaciones*	H1	L-Cv	L-asimetría	L-curtosis	PMA
1	15	2,21	0,12	0,00	0,12	833,53
2	48	2,39	0,14	0,08	0,13	935,96
3	13	0,37	0,12	0,09	0,12	1135,14
4	8	-0,64	0,10	0,12	0,17	2201,48
5	41	-0,65	0,10	0,05	0,13	1472,14
6	14	1,14	0,13	0,09	0,13	1154,81

*13 estaciones fueron descartadas por tener una discordancia excesivamente alta

FDP con mejor ajuste en las subregiones homogéneas

Las FDP que mejor ajustaron a los registros de PMA en las subregiones homogéneas fueron la GNO y la PE3. Por simplicidad, se usó esta última como modelo regional de la UE en la etapa de mapeado.

Curvas de crecimiento regional en las subregiones homogéneas

La Figura 2 muestra la curva de crecimiento de cada subregión homogénea, obtenidas a partir de la FDP y PE3. De la figura se puede extraer que el periodo de retorno de un año cuya precipitación anual sea, por ejemplo, del 80 % de la PMA ($P_i/P_{media} = 0,80$) al sur del estado Anzoátegui (subregión 6) sería de 4,7 años, es decir, ese período corresponde al tiempo de

recurrencia que tendría el evento.

Mapeado del periodo de retorno de años secos

En la Figura 3, a manera de ejemplo, se muestra la probabilidad de ocurrencia de un año donde la precipitación anual es igual al 60 % de la PMA en la UE, obtenido con el RSARFLM V.3 de Núñez (2011).

Las estaciones con mayor PMA se ubican en el lado de barlovento de las cadenas de montaña con mayor elevación de cresta, sugiriendo que el factor orográfico determina en gran medida la formación de bandas húmedas (Figura 4). Estos resultados coinciden con las observaciones de Hernández (1995), quien refirió la existencia de un gradiente pluviométrico positivo en dirección este-oeste. Al este de la UE las cadenas de montañas de mayor altura (Cordillera de la Costa al norte de Anzoátegui y Guárico) se orientan casi

paralelas a los Alisios durante la mayor parte del año; por esta razón y a mesoescala, puede suponerse que esta corriente asciende en la vertiente oriental de Los Andes, se enfría y finalmente genera precipitaciones en las nacientes

de los ríos Guanare y Portuguesa. En la vertiente este del Macizo del Turimiquire (Bergantín, noreste de Anzoátegui) hay una estrecha franja húmeda, lo cual probablemente sea consecuencia del factor orográfico.

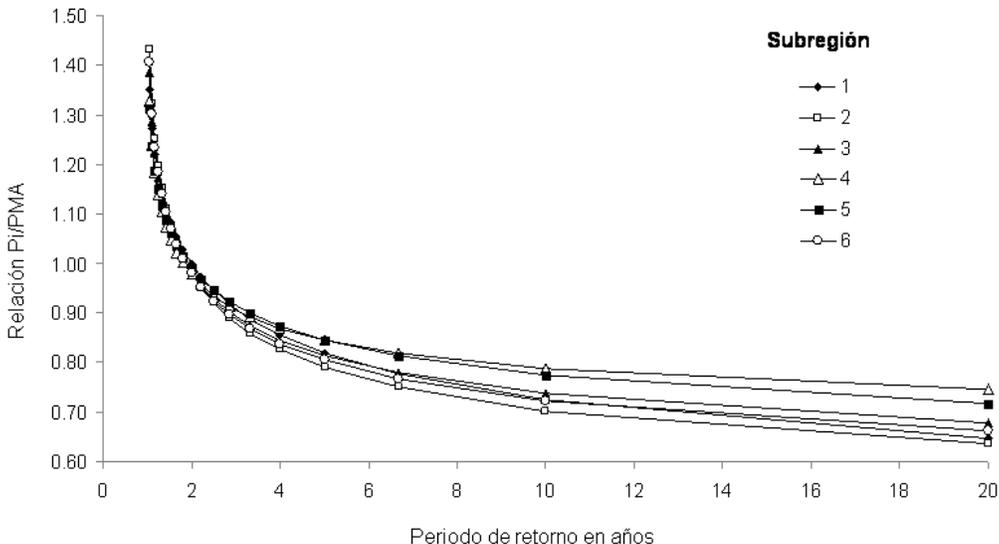


Figura 2. Curvas de crecimiento regional de las subregiones homogéneas en la UE

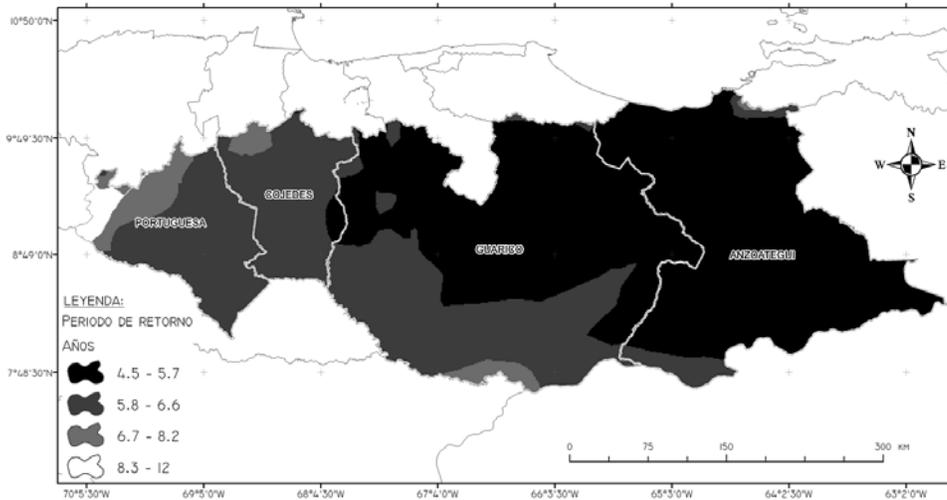


Figura 3. Periodo de retorno de un año cuya precipitación anual es 60 % la PMA en la UE

Las estaciones de la UE, ubicadas en subregiones con climas semiáridos, presentan las series de PMA con los más altos coeficientes de variación. Esta característica guarda relación con el origen convectivo de las precipitaciones (Suárez, 2000) y el impacto indirecto de algunas

perturbaciones tropicales que se originan o cruzan el Mar Caribe. Los años secos más extremos en la UE, ocurren en la franja costera y región norcentral del estado Anzoátegui, posiblemente como consecuencia de la escasa influencia de la Zona de Convergencia Intertropical y la

evidenciada teleconexión con la fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur (Martelo y Pérez, 2010), el cual, bajo ciertas circunstancias, puede alterar los patrones de circulación atmosféricos sobre esta

región, especialmente al coincidir con anomalías térmicas positivas y muy significativas en las aguas superficiales del Atlántico Norte (Paredes et al., 2008).

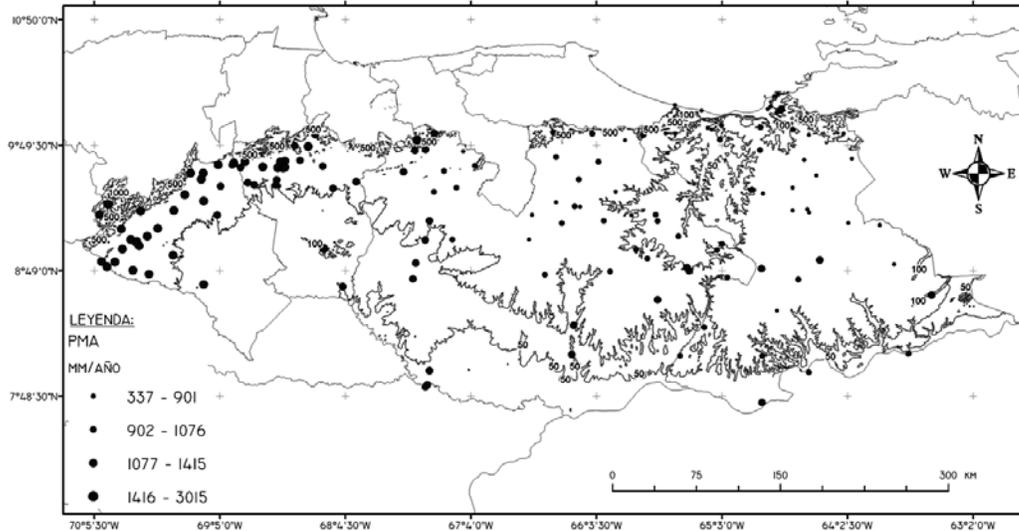


Figura 4. PMA de las estaciones en la UE. Los números al lado de las curvas indican su altitud

Las distribuciones de frecuencia de la PMA indican que las zonas con climas semiáridos tienen una alta heterogeneidad regional, que el L-Cv regional es inversamente proporcional a la PMA y que el L-asimetría y L-curtosis regionales no están correlacionados linealmente con la PMA. Estos resultados son similares a los reportados por Núñez et al. (2011) en la región árida del Coquimbo en Chile y Hallack-Alegría y Watkins (2007) en Sonora y Baja California-México, por lo que pudiese ser una condición generalizable a las regiones áridas y semiáridas.

La parte alta de las cuencas de los ríos Unare (norte de Anzoátegui), Aragua (noreste de Anzoátegui), Guárico, Manapire (centro de Guárico) y Caris (sur de Anzoátegui), así como los ejes geográficos Anaco-Potrero (Anzoátegui), Puerto La Cruz (Anzoátegui)-Chaguaramas (Guárico) y la Mesa de Morichal Largo (sur de Anzoátegui) son las regiones con mayor probabilidad de ocurrencia de años secos en la UE. Las zonas con mayor recurrencia de años secos concuerdan con las reportadas por Hernández (2008), quien usó el índice de precipitación estandarizada (SPI) con agrupación mensual para caracterizar esta condición en la UE.

Esta coincidencia indica que el ARF-LM es un método alternativo al SPI, pero a diferencia de éste, el ARF-LM aprovecha las series discontinuas (no se requiere estimar datos faltantes) y de corta longitud (por ejemplo, 20 años).

Dada la importancia de las curvas de crecimiento regional para la toma de decisiones en materia de planificación agrícola, en especial, del rubro cereales, sugerimos su empleo por parte de los entes crediticios y de apoyo técnico localizados en la UE.

CONCLUSIONES

La unidad de estudio presenta seis regiones homogéneas en cuanto a la distribución de la precipitación media anual.

La función de distribución de probabilidad que mejor ajusta a la precipitación anual es la generalizada normal, seguida por la Pearson tipo III.

Las zonas altas de las cuencas de los ríos Unare, Aragua, Guárico, Manapire y Caris, así como los ejes geográficos Anaco-Potrero, Puerto La Cruz-Chaguaramas y la Mesa de Morichal Largo tienen el riesgo de ocurrencia de años

secos más alto dentro de la región evaluada.

AGRADECIMIENTO

Proyecto PEI-2011001251 (FUNDACITE-Venezuela). Participaron el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo y el Grupo de Investigación de Cuencas Hidrográficas y Recursos Hídricos del Programa Ingeniería de la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Ezequiel Zamora, y con el apoyo del Programa RALCEA-EUROCLIMA y el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC). Se agradecen los valiosos aportes de Jorge Núñez (CAZALAC) y el Dr. Koen Verbist (UNESCO).

LITERATURA CITADA

1. Álvarez, M., J. Puertas, B. Soto y F. Díaz-Fierros. 1999. Análisis regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida. *Ingeniería del Agua* 6(4): 283-290.
2. Easterling, R., C. Peterson y T. Karl. 1996. On the development and use of homogenized climate data sets. *Journal of climate* (9): 1429-1434.
3. Hallack-Alegría, M. y D. Watkins. 2007. Annual and warm season drought intensity-duration-frequency analysis for Sonora, Mexico. *Journal of Climate* 20(9): 1897-1909.
4. Heim, R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *American Meteorological Society* 83(8): 1149-1165.
5. Hernández, R. 1995. El Clima en Venezuela. Dirección General de Cuencas Hidrográficas, Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. Caracas. 80 p.
6. 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. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 216 p.
7. Hosking, J. y J. Wallis. 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 224 p.
8. Keyantash, J. y A. Dracup. 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1167-1180.
9. Martelo, M.T. y M. Pérez. 2010. Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad agroalimentaria en la República Bolivariana de Venezuela. INIA, FAO y embajada del Reino Unido. Caracas. 111 p.
10. Mendoza, M. y M. Puche. 2007. Evaluación de la ocurrencia de sequía en localidades de Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 24: 661-678.
11. Núñez, J. 2011. RSARFLM v.3. Regional Frequency Analysis L-moments R Script. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC). La Serena, Chile. 80 p.
12. Núñez, J., K. Verbist, J. Wallis, M. Schaefer, L. Morales y W. Cornelis. 2011. Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. *Journal of Hydrology* (405) 3-4: 352-366.
13. OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. OMM N° 1006. Ginebra. 28 p.
14. Paredes, F., J. Millano y E. Guevara. 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.
15. Pérez, C. 2004. Técnicas de análisis multivariante de datos: aplicaciones con SPSS. Pearson Prentice Hall, Madrid.
16. Suárez, J. 2000. Análisis de las lluvias acumuladas extremas para cinco, diez y quince días en la Región Norte Costera de Venezuela. Dirección General de Cuencas Hidrográficas, Dirección de Hidrología y Meteorología.

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. Caracas. 260 p.

17. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2010. Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de

aplicación en América Latina. Documento N° 27. UNESCO. Montevideo. 87 p.

18. Wallis, J., M. Schaefer, B. Barker y G. Taylor. 2007. Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrology Earth System Science* 11(1): 415-442.