

8.4. EVOLUCIÓN CLIMÁTICA (1901-2012) EN LA SIERRA: EFECTOS AMBIENTALES

Leoncio García-Barrón

Universidad de Sevilla

Resumen

A partir de los datos meteorológicos de precipitación y temperatura en la Sierra se elabora el índice termopluviométrico Q de Emberger durante el periodo 1901-2012. El análisis de la serie Q permite conocer el comportamiento temporal de la aridez e inferir previsiones sobre potenciales efectos ambientales. Hemos detectado que la característica más relevante es la irregularidad interanual, con incremento de probabilidad de valores extremos de aridez, lo que requiere medidas plurianuales de gestión ambiental.

1. Introducción

Entre los temas científicos de mayor actualidad informativa, junto a determinadas cuestiones de salud, destaca el cambio climático y su impacto. En el área de clima mediterráneo, uno de los potenciales efectos del cambio climático a lo largo del siglo XXI es el déficit progresivo de recursos hídricos. En particular, el Sur de la Península Ibérica es una zona de riesgo. La actualización regional al 4º informe del IPCC por la Junta de Andalucía (2016) prevé para final de siglo XXI, la reducción de humedales y el aumento significativo de la superficie sometida a condiciones de aridificación. Confirma las predicciones de variados autores (Iglesias *et al.*, 2005; Gao and Giorgi, 2008; Costas y Soares, 2012). Por tanto, las comarcas del suroeste de Península Ibérica son potencialmente sensibles a los procesos de desertificación inducidos por el cambio climático. Esto se justifica fundamentalmente por la previsible disminución de la precipitación y el incremento de la evaporación asociado al calentamiento. La presente comunicación analiza el desarrollo histórico del comportamiento de indicadores bioclimáticos, a partir de los registros de variables meteorológicas desde inicio del siglo XX. La extrapolación hacia el siglo XXI de los resultados es un mecanismo que permite vislumbrar, en su caso, riesgos por disminución de disponibilidad hídrica con repercusión

en la vegetación, la agricultura y para el uso doméstico e industrial, lo que implicaría grave impacto ambiental, social y económico.

Pretendemos determinar la evolución temporal del riesgo de aridificación en la Sierra, en el Suroeste de la Península Ibérica, durante el período 1901-2012. Para cuantificar las condiciones interanuales de sequedad/humedad climática dentro de una escala de aridez utilizamos el *Índice Anual Termo-pluviométrico Q de Emberger*.

Los resultados del análisis pueden contrastarse con los obtenidos por el autor, en áreas geográficas próximas del suroeste peninsular, mediante el *Índice de Aridez UNEP* (1993), basado en la relación entre precipitación y evapo-transpiración potencial *ETP*, adoptado en los informes de FAO (García-Barrón et al, 2019).

2. Área de estudio

El área de estudio, que en el ámbito de las Jornadas del Patrimonio denominaremos genéricamente Sierra, está centrada geográficamente alrededor del Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche. Se extiende desde la franja sur de Extremadura hasta tercio septentrional de la provincia de Huelva, incluida parte de El Andévalo, y desde la zona oriental de Alentejo portugués en las riberas del Guadiana hasta la Sierra de Sevilla, al norte del valle del Guadalquivir. Está sometida al dominio de clima mediterráneo con fachada atlántica. Estudios precedentes (García-Barrón *et al.*, 2013) han puesto de manifiesto la alta correspondencia del comportamiento temporal de las variables meteorológicas en distintos observatorios del suroeste peninsular. Por tanto, el área estudiada comparte el mismo ámbito climático regional del suroeste por lo que las conclusiones pueden generalizarse al conjunto de la región.

Los datos térmicos y de precipitación utilizados en la investigación corresponden a la base de datos Global Climate Monitor (35300, 35301, 35302) y han sido proporcionados por Climate Research Group de la Universidad de Sevilla.

La ocupación agroforestal del área es diversa; está compuesta por olivares de montaña, castaños en la zona central más húmeda, plantaciones de eucaliptos a partir de mediados del siglo XX y principalmente por dehesas de encinas (*Quercus ilex*) y alcornoques (*Quercus suber* L.), como ecosistema con dedicación preferente a ganadería extensiva (ovino, caprino, vacuno y el cerdo ibérico). La vegetación de dehesa presenta

elementos xerofíticos adaptados a periodos de sequía prolongados y con gran variabilidad interanual e intranual.

3. Metodología

Para analizar los efectos ambientales la evolución climática en la Sierra utilizamos el indicador termopluviométrico *Índice Anual Termo-pluviométrico Q de Emberger*. (1930). El índice Q se formula para cada uno de los n años del periodo de estudio donde P = Precipitación anual (mm); M = temperatura media de las máximas del mes más cálido ($^{\circ}\text{C}$); m = temperatura media de las mínimas del mes más frío. Sus unidades son $\text{mm}/(^{\circ}\text{C})^2$.

$$Q_n = (100 P_n) / (M_n^2 - m_n^2) \quad (1)$$

Dado que la temperatura m es un factor limitante para la vegetación, Emberger genera un climograma bidimensional con coordenadas (m, Q) . En función de ambos valores establece la clasificación de tipos de clima mediterráneo en escala de aridez/humedad. La separación gráfica entre las clases está fijada por las correspondiente líneas de valores umbrales. Además, a cada uno de los tipos de clima se le adscribe una vegetación asociada. Las distintas zonas locales en que predomina un tipo de vegetación indica la correspondiente distribución geográfica habitual de los tipos de clima mediterráneo. La encina ofrece un amplio rango de adaptación a condiciones termopluviométricas. La tabla 1 muestra la clasificación del clima mediterráneo y la indicación de vegetación característica.

Clima mediterráneo	Árido <i>MeA</i>	Semi-árido <i>MeSA</i>	Sub-húmedo <i>MeSH</i>	Húmedo <i>MeH</i>
Vegetación característica	Matorral xerófilo	Pino carrasco	Olivo, alcornoque	Castaño

Tabla 1. Clasificación del clima mediterráneo

A partir de los valores anuales calculados del índice Q se genera la correspondiente serie interanual empleada para analizar la evolución temporal. El procedimiento de estudio (García-Barrón *et al.*, 2011) utiliza la tendencia lineal y las desviaciones relativas

acumuladas que muestra secuencias plurianuales diferenciadas. Para determinar la evolución interanual de variabilidad empleamos la serie del coeficiente variación móvil por periodos de 11 años (Cv_{11}), obtenido para cada año n como cociente de la desviación típica de la subserie parcial formada por el año n y los diez anteriores, y su correspondiente promedio.

$$Cv_{(11)n} = \sigma_{11} / \mu_{11} \quad (2)$$

4. Resultados y valoración

Información climática general de la Sierra

Las variables meteorológicas utilizadas en el análisis de impacto ambiental son temperatura y precipitación. Por ello, como información preliminar se muestra la evolución interanual (1901-1912) de la precipitación anual P (figura 1a) y del promedio de la temperatura media anual T_{md} (figura 1b) con las respectivas rectas de tendencia. Se observa que característica más relevante de la serie pluviométrica es la irregularidad ($Cv = 0,29$) con grandes oscilaciones de los totales anuales, incluidos periodos plurianuales de sequía, de forma que la tendencia (¡no descendente!) no tiene significación climática. Sin embargo, la serie térmica presenta una tendencia ascendente de aproximadamente $1^\circ\text{C}/\text{siglo}$.

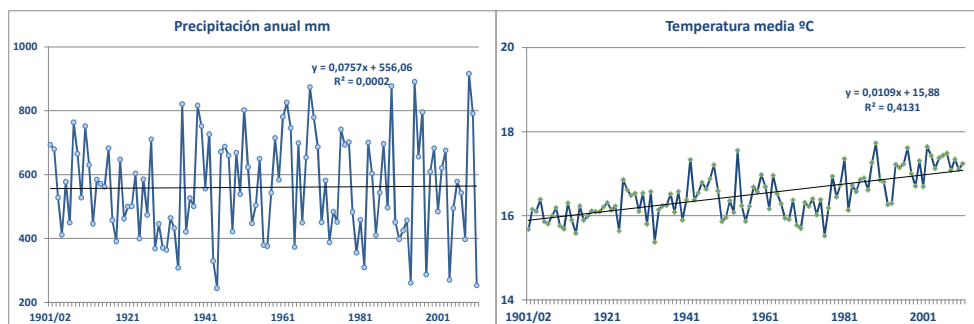


Figura 1. Evolución interanual de la precipitación (a) y temperatura media (b)

También se incluye la representación gráfica de la distribución intranual de la precipitación y de la temperatura (Figura 2 a, b). La precipitación intranual muestra una curva unimodal, ascendente en otoño y suavemente descendente desde final invierno hasta mínima, en ocasiones nula, en los meses de verano. La distribución intranual de la

temperatura es opuesta a la precipitación: descendente en otoño, hasta alcanzar mínimo invernal, ascendente en primavera y máxima en verano. Se incluye el perfil promedio mensual de la temperatura mínima, media y máxima.

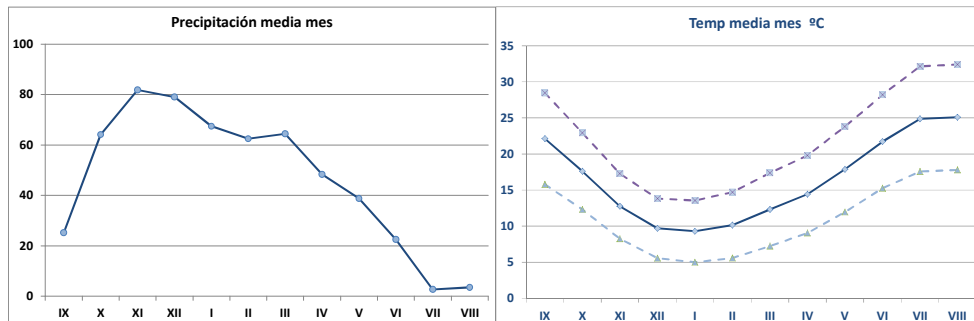


Figura 2. Distribución intranual de la precipitación (a) y temperatura (b)

Análisis temporal del índice termo-pluviométrico Q de Emberger

La ventaja del índice Q de Emberger es que es un indicador clásico basado en variables meteorológicas accesibles. Por su utilización durante décadas, acumula amplia difusión en informes sobre distintas áreas ambientales, asociadas principalmente a clima mediterráneo. Esto permite establecer estudios comparativos en distintas zonas geográficas y entre distintas épocas, por lo que actualmente mantiene plena vigencia. Durante el periodo N completo de observación 1901-2012, el promedio interanual de la temperatura mínima m del mes más frío es $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el promedio calculado del índice Q es $53,1\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$

La figura 3 muestra la evolución interanual del índice Q , en el área geográfica de la Sierra. La tendencia lineal de la serie tiene pendiente ligeramente descendente ($y = -0,0027x + 57,77$) y sin significación ambiental, ya que la varianza explicada es inferior al uno por ciento ($R^2 < 0,01$). La característica más relevante de la serie Q es la irregularidad. Muestra de ello es el elevado coeficiente de variación ($Cv_Q = 0,29$). La evolución del valor central, por tanto, no es suficiente predictor del comportamiento temporal del índice. En la gráfica también se representa la línea de suavización de Q de media móvil centrada de 11 años. El periodo seleccionado de 11 años. Este agrupamiento plurianual, coincidente con el ciclo de actividad solar, amortigua el perfil y atenúa el rango de variabilidad pero resalta la caracterización general de Q durante el periodo de estudio

La sensibilidad de Q indica la capacidad de respuesta frente a las alteraciones interanuales de los factores térmicos y pluviométricos. Para ello determinamos el grado de simultaneidad de las desviaciones, mediante el coeficiente r de correlación Pearson's,

durante el periodo de estudio, entre las series temporales de Q_n y de las de las correspondientes variables meteorológicas P_n y τ_n , siendo $\tau_n = (M_i^2 - m^2)$ el denominador de la ecuación 1. Obtenemos $r_P = 0,97$ respecto de la precipitación y solamente $r_\tau = -0,29$ respecto de la variable térmica. Se deduce que el efecto de la precipitación P sobre el comportamiento interanual de Q es mucho más intenso. Consideramos que ello es debido a la mayor variabilidad temporal de P ($C_{VP} = 0,29$) en comparación con la mayor estabilidad de la serie térmica interanual ($C_{V\tau} = 0,07$) a lo largo del periodo completo analizado.

En el diagrama de Emberger los valores m , Q anteriormente indicados corresponden gráficamente al entorno de la zona de tránsito entre Mediterráneo semiárido (MesA) y Mediterráneo subhúmedo (MesH). En el intervalo $m=1$ $^{\circ}\text{Cam} = 8$ $^{\circ}\text{C}$, la línea umbral de clasificación entre MesA y MesH se ajusta aproximadamente a una línea teórica

$$Q_o = 0,0003m^6 - 0,0134m^5 + 0,209m^4 - 1,470m^3 + 4,416m^2 - 3,875m + 54,67 \quad (4)$$

Para cada año n se calcula el valor umbral teórico Q_{on} en función de m_n (ecuación 5) y se compara con el valor obtenido por aplicación de la ecuación 1. Si $Q_n < Q_{on}$, el clima anual es MeSA; por el contrario si $Q_n > Q_{on}$ el clima anual es MeSH.

Los resultados muestran que 3 % de años corresponden a clima mediterráneo árido (MeA), 57% corresponden a MesA y 40% a MeSH, Por tanto, según la clasificación de Emberger, globalmente en el área de estudio (aunque pueden existir zonas microclimáticas particulares), los años plenamente áridos MeA son excepcionales y prácticamente inexistentes los plenamente húmedos MeH, son minoritarios los años subhúmedos MeSH y mayoritarios los semiáridos MeSA.

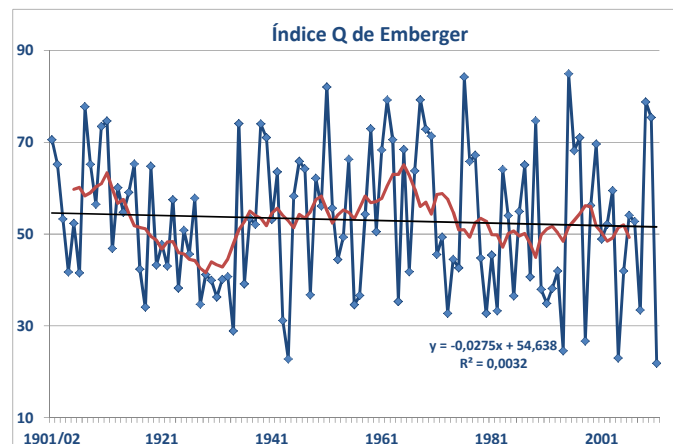


Figura 3. Evolución interanual del índice Q, con línea de media móvil centrada y recta de tendencia

Pese a la falta de tendencia significativa, las desviaciones relativas acumuladas respecto del valor límite Q_{on} permiten distinguir secuencias plurianuales diferenciadas según el grado de aridez. En la figura 4 se observa, superpuesto a los dientes de sierra, un tramo descendente desde 1916 hasta 1936, que indica alta frecuencia de años semiáridos ($Q_n < Q_{on}$). Posteriormente hay un periodo fluctuante con oscilaciones anuales entre MesA y MesH. Destaca, en el último treintenio, una nueva fase descendente que asociamos a un periodo semiárido. Por el contrario, las secuencias subhúmedas (indicadas en verde) son más breves.

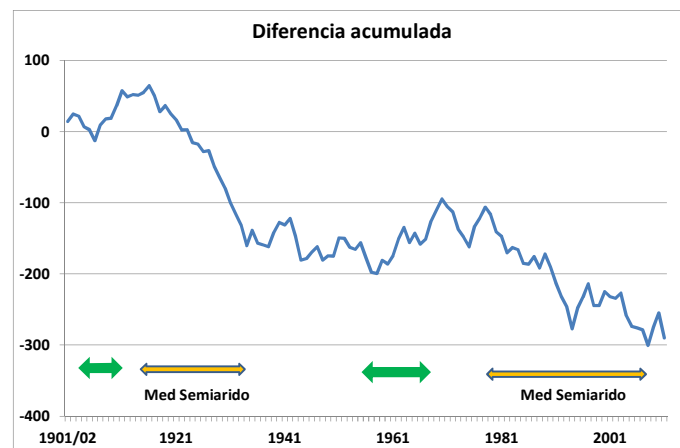


Figura 4. Clasificación de secuencias por desviaciones acumuladas respecto Q_{on} , límite teórico anual entre clima mediterráneo semiárido y mediterráneo subhúmedo

Dada la alta variabilidad detectada durante el periodo completo de estudio, interesa analizar detalladamente la evolución interanual del índice Q . Para ello, calculamos el coeficiente de variación móvil centrado, por periodos de once años Cv_{11} . La figura 5 muestra el comportamiento interanual. Se observa durante el primer tercio del siglo XX valores entorno a 0,20, para subir y fluctuar entre 0,25 y 0,35 hasta 1990, en que se produce un nuevo incremento en el entorno de 0,40.

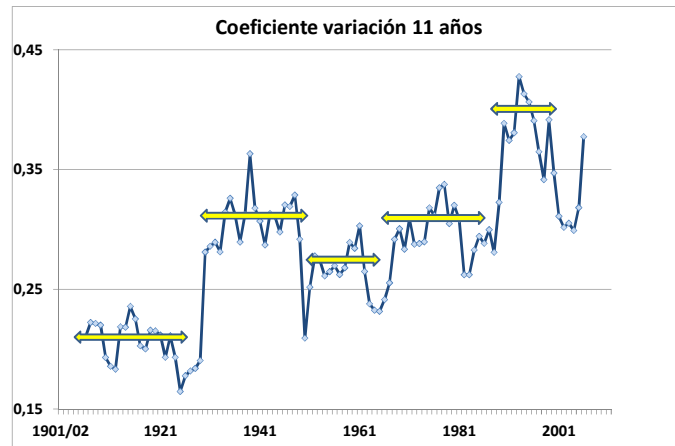


Figura 5. Coeficiente de variación del índice Q por periodos móviles de 11 años

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que la aplicación del índice Q de Emberger es una metodología adecuada para analizar la evolución climática de áreas geográficas influidas por el clima mediterráneo. Aunque sería posible diferenciar niveles locales de aridificación consideramos que el análisis temporal permite detectar la evolución general de la zona estudio, de la que se inducen pautas de comportamiento futuro. Destaca la irregularidad temporal de Q , sin tendencia significativa. Sin embargo, es posible detectar secuencias con comportamiento diferenciados; en particular, durante el último treintenio se detecta alta proporción de años semiáridos.

Dado el incremento progresivo de la variabilidad interanual, es previsible durante el siglo XXI la ocurrencia más frecuente de valores extremos de aridez, con años excesivamente húmedos y, principalmente, años excesivamente áridos. Estos resultados que se describen en la sección anterior no presentan discrepancias con la interpretación de los alcanzados por el autor (García-Barrón *et al*, 2019) mediante el Índice de Aridez I_A de UNEP en áreas geográficas del suroeste peninsular. Por tanto, permite deducir las siguientes conclusiones generales relacionadas con la aridificación de la Sierra:

La irregularidad climática genera potenciales impactos ambientales inducidos por la posible aridificación futura de la zona. Aunque la vegetación (principalmente el bosque de dehesa) está adaptadas a condiciones de sequía interanual, sin embargo, un incremento de la irregularidad de la aridez, con recurrencia de valores extremos, podría afectar severamente al ecosistema: Erosividad, riesgo de incendios, limitación en regeneración natural de especies vegetales y debilitamiento de defensas frente a agentes patógenos, así

como disminución recurrente en la producción anual de pastos, hortofrutícola o de montanera, etc.

Para mitigar los potenciales efectos de la extensión e intensificación de la aridez a lo largo del siglo XXI se requiere la planificación de acciones estructurales, con enfoque plurianual: en la ordenación de los ecosistemas naturales y agrosilvopastorales, en la regulación hidrológica, en la adecuación a las condiciones biogeográficas naturales de las comunidades vegetales que se quieran reimplantar, así como, en el desarrollo de programas específicos de investigación y seguimiento.

6. Bibliografía

- Costa AC, Soares A. (2012) “Local spatiotemporal dynamics of a simple aridity index in a region susceptible to desertification”. *Journal of Arid Environments*, 87, pp. 8-18.
- Emberger, L. (1930) “Sur une formule climatique applicable en géographie botanique”. *Compte-rendu hebdomadaire des séances de l'Académie des Sciences* 191, pp. 389-390.
- Gao X, Filippo G. (2008) “Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model”. *Global and Planetary Change*, 62, pp. 195-209.
- García-Barrón L, Aguilar M, Sousa A. (2011) “Evolution of annual rainfall irregularity in the southwest of the Iberian Peninsula”. *Theoretical and Applied Climatology*, 103, pp. 13-26.
- García-Barrón L, Morales J, Sousa A. (2013) “Characterisation of the intra-annual rainfall and its evolution (1837–2010) in the southwest of the Iberian Peninsula”. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, pp. 445–457.
- García-Barrón L, Sousa A. (2019) “Evolución del índice de Aridez I_A en zonas de dehesa del suroeste de la Península Ibérica”. *Revista de Climatología*, 19, pp. 59-65.
- Iglesias A, Estrela T, Gallart F. (2005) *Impacts on hydric resources. A preliminary general assessment of the impacts in Spain due to the effects of climate change*. Ministerio de Medio Ambiente, España.

- Junta de Andalucía (2016) *El clima de Andalucía en el siglo XXI. Escenarios locales de cambio climático de Andalucía. Actualización al 4º informe del IPCC*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.
- UNEP (1993) *World Atlas of Desertification*. The United Nations Environment Programme UNEP, London.