

ÍNDICE COORDINADO DE SEQUÍA EN PASTOS EN LA REGIÓN DE MURCIA

AUTOR

D. Félix Díaz Cid

TUTORES

Dña. Ana María Tarquis Alfonso

D. Antonio Saa Requejo

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER EN FÍSICA DE SISTEMAS
COMPLEJOS
CURSO 2014-2015

A mis padres y hermana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a los tutores de este Trabajo de Fin de Master: Ana María Tarquis Alfonso y Antonio Saa Requejo, por el tiempo invertido en ayudarme a realizar este trabajo así como enseñarme a investigar correctamente e introducirme en el interesante mundo de la predicción de sequía y la estadística. Mi agradecimiento a Juan José Martín Sotoca por el esfuerzo empleado en enseñarme la parte más técnica de este trabajo y porque su Trabajo de Fin de Master ha supuesto una guía para este trabajo, así como a Javier Borondo por la realización del programa que permite descargar los datos numéricos de MODIS.

Agradezco a todos los profesores del Máster en Física de Sistemas Complejos por su excelente labor docente e investigadora.

Agradezco al Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla-La Mancha (SIAR) y al Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM) el tener sus datos disponibles en internet de modo que se pueda realizar investigación a partir de ellos que revierta en una mejora para aquellas personas dependientes en alguna medida de dichos servicios.

También quiero agradecer al Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales (CEIGRAM), por haber recibido la financiación que otorga en su convocatoria de ayudas a jóvenes investigadores.

Índice de contenido

Abstract.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
2.1. Índices de vegetación.....	11
2.2. Índice SPI.....	12
2.3. Índices PI5mm y PI10mm.....	12
2.4. Sensor MODIS.....	13
2.5. Selección de áreas de estudio.....	14
2.6. Estaciones pluviométricas.....	18
2.7. Filtrado de datos del sensor MODIS.....	19
2.8. Estandarización de datos pluviométricos.....	21
2.9. Test normalidad de Shapiro-Wilk.....	22
2.11. Seguro agrario indexado.....	23
2.12. Análisis factorial exploratorio.....	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
3.1. Filtrado del índice NDVI. Comparativa entre métodos.....	26
3.2. Comparativa entre índices de vegetación.....	27
3.3. Ajuste a la normal de NDVI.....	32
3.4. Índice SPI.....	35
3.5. Análisis PI5mm, NDVI y NDWI.....	36
3.6. Correlación entre índices.....	47
4. CONCLUSIONES.....	53
5. BIBLIOGRAFÍA.....	55
Apéndice 1: Test Shapiro-Wilk.....	58
Apéndice 2. Resultados análisis factorial con máximos y mínimos.....	59

Abstract

This Master dissertation analyzes four areas in Murcia region (Spain) to study the application of the indexed pastures insurances in arid and subarid conditions. For this purpose four zones of 2,5 km have been selected, all of them close to meteorological stations, with records covering the period since 2001 to 2012 and with compound MODIS images of 500 m x 500 m from eight days intervals on that period. In addition to obtain historical series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), other indices (NDWI, NDDI and NDWU) have been computed. The results of this study show that NDWU provides additional information to that in the NDVI. In fact, according to our results, NDDI does not provide accurate information for the regions analyzed in this particular case study.

By using the Shapiro-Wilk test, we test the goodness of the fit to a normal distribution of the 8-day-resolution NDVI time series along a year. The results reveal that fit to the model is poor or very poor for most of the areas and seasons.

In an attempt to relate precipitancy indices and drought situations in the four areas selected, we have showed that Standardized Precipitation Index (SPI) cannot be used accurately for drought intensity assessment. Then, new indices have been formulated based on Markov chains: PI5mm and PI10mm. These indices can assess on isolated droughts which are missed by using indexed insurances. Nonetheless, it has also been observed that abnormal droppings in the NDWI index often coincide with drought lapses well established by indexed insurances.

Factor analysis has been applied for investigating variable relationships from a set of the commonly used climate variables. The results show that a small set of variables can be get from the large set including the cumulated precipitation in a period, the evapotranspiration, the PI5mm index and the olympic average of NDVI. We have checked any relationship among these representative variables, but there isn't. Based on this result, we can conclude that these variables provide complementary information and provide a base to establish an effective risk-management tool for coordinated drought insurance.

- NDVI: Normalized Difference Vegetation Index. Satellite index which measure the photosynthetic activity.
- MODIS: Moderate resolution Imaging Spectroradiometer. Instrument aboard satellites orbiting around the Earth acquiring data in seven wavelengths.
- NDWI: Normalized Difference Water Index. Satellite index which measures the water content of vegetation canopies.
- NDWU: Normalized Difference Water Index. Satellite index which measures the water content of vegetation canopies (similar definition to NDWI but using other wavelengths).
- NDDI: Normalized Difference Drought Index. Satellite index obtained from NDVI and NDWI.
- SPI: Standardized Precipitation Index. Traditional precipitation index based on the statistical distribution of cumulative precipitation.
- PI5mm and PI10mm: precipitation index based in the time to obtain an amount of cumulative precipitation.

1. INTRODUCCIÓN

La definición de sequía es muy amplia para poder incluir el gran número de condiciones que existen en la agricultura, y que dependen del balance entre la pluviometría y la evaporación, variabilidad del tiempo, capacidad de retención de agua del suelo, tipo de cultivo, hábitos de enraizamiento y estado de desarrollo (Hayes, 2004). En zonas con una alta pluviometría, una semana sin lluvia puede causar una pérdida significativa de rendimientos. Sin embargo, en zonas semiáridas, este tipo de sequía es común y las prácticas de cultivo se modifican para tener en cuenta periodos de tiempo seco más largos de los normales (sequías) que pueden durar meses o incluso años (Loomis y Connor, 2002).

La mayor parte del pastoralismo se practica bajo condiciones de secano con un suministro de agua variable dependiente directamente de la lluvia, solo en algunos casos incluye además los suministros locales por flujo superficial y por infiltración. Por lo tanto, las estrategias relacionadas con la gestión del agua en pastoreo en España están principalmente relacionadas con la falta de agua (San Miguel Ayanz, 2001).

El pasto se define como cualquier forraje vegetal que sirve de alimento para el ganado, bien en pastoreo o bien como forraje. Por tanto hay pastos herbáceos, pastos arbustivos y pastos leñosos. Los pastos de origen agrícola son derivados de alguna actividad agrícola y comprenden los cultivos forrajeros (pastos sembrados en una rotación), los rastrojos, los barbechos y el erial a pastos. Una característica del pasto es su fuerte estacionalidad: la producción se concentra en primavera y otoño, secándose en verano (Díaz-Ambrona, 1998a, 1998b).

El Sistema de Seguros Agrarios (MAGRAMA, 2013 a, 2013b) con el Seguro de cobertura de los daños en pastos aprovechados por el ganado en régimen extensivo está aplicando nuevas tecnologías, como la teledetección (Flynn, 2006), con el fin de solucionar los problemas de peritación que surgen cuando se tiene que determinar la cantidad y calidad del pasto, en distintas zonas del territorio nacional. El seguro de cobertura de los daños en pastos es actualmente el principal instrumento para hacer frente al gasto que supone la necesidad de suplemento de alimentación del ganado reproductor (<http://www.agroseguro.es/indices/Pastosx>).

A pesar de las mejoras introducidas en el seguro, existen ciertas discrepancias en la definición de los umbrales de garantía y los porcentajes de indemnización aplicada, así como la relación entre índices satelitales y estado real del pasto. Hemos de tener en cuenta la gran complejidad del problema a abordar y las variaciones que existen en los distintos tipos de pastos dentro de la Península Ibérica. Varios trabajos han apuntado a dos puntos críticos sobre la aplicación de seguros indexados: 1) Las zonas homogéneas seleccionadas (Martínez-Sotoca, 2014; Martínez-Sotoca et al., 2015a), 2) Las funciones estadísticas usadas en el estudio de la frecuencia de valores del NDVI (Normalized Difference Precipitation Index) (Martínez-Sotoca, 2014; Martínez-Sotoca et al., 2015b). El presente trabajo se centrará sobre este segundo punto.

En las Grandes Llanuras de Estados Unidos se ha utilizado, como complemento al índice de vegetación NDVI, distintas herramientas pluviométricas como el índice SPI (Standardized Vegetation Index) (McKee, Doesken, & Kleist, 1993, 1995). La ventaja de los índices basados en la precipitación es que permiten establecer una forma alternativa de encontrar sequía que combinado con el sistema actual basado en la teledetección puede enriquecer el sistema de predicción en base a la mejora de detección de estados de sequía.

Este trabajo tiene como objetivo general el estudiar la aplicación del seguro indexado en las condiciones de aridez que presenta la Región de Murcia. Para ello se establecen los siguientes objetivos concretos:

- 1) Estudiar varios índices de vegetación tradicionales aparte del NDVI.
- 2) Analizar el comportamiento estadístico del NDVI por zonas y épocas del año.
- 3) Estudiar índices pluviométricos que definan estados de sequía y diseñar nuevos índices adaptados a zonas áridas.
- 4) Comparación de los índices con el seguro agrario indexado.
- 5) Analizar la correlación entre distintos índices de vegetación, pluviométricos y variables climáticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Índices de vegetación.

El índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Flynn, 2006) estima la actividad fotosintética de las cubiertas vegetales y es una de las herramientas más utilizadas para intentar predecir sequía. Sigue la ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{857} - \rho_{645}}{\rho_{857} + \rho_{645}} \quad (1)$$

Donde ρ_{645} es la radianza (en unidades de reflectancia) en un canal rojo alrededor de 645 nm y ρ_{857} es la radianza (en unidades de reflectancia) en un canal infrarrojo cercano alrededor de 857 nm. La primera banda es una banda de absorción propia de la clorofila mientras que la segunda del la mesófilo esponjoso, una capa de las hojas (Gao, 1996).

El índice está normalizado para tomar valores entre -1 y 1, siendo los valores menores de 0 indicadores de falta de actividad fotosintética. A mayor valor de NDVI mayor actividad fotosintética.

Otra herramienta utilizada para el análisis de sequía es el índice NDWI (Normalized Difference Water Index) que indica el contenido de agua en las cubiertas vegetales. Sigue la ecuación:

$$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1240}}{\rho_{857} + \rho_{1240}} \quad (2)$$

Donde ρ_{1240} es una banda de absorción infrarroja en la que existe una clara diferencia en los valores entre la vegetación húmeda y seca. En estudios de distintos autores se emplea el mismo índice cambiando la banda del infrarrojo por la banda 6 (1628-1652 nm) o la banda 7 (2105-2155 nm) del MODIS en lugar de la banda 5 (1230-1250 nm) aquí empleada. En este estudio se ha optado por utilizar la banda 5 por ser la primera propuesta.

La U.S. Geological Survey (http://deltas.usgs.gov/fm/data/data_ndwi.aspx) emplea otra definición índice de NDWI, que en este artículo llamaremos NDWU (Normalized Difference Water index U.S.), basada en (McFeeters, 1996)

$$NDWU = \frac{\rho_G - \rho_{857}}{\rho_G + \rho_{857}} \quad (3)$$

Donde ρ_G es la reflectancia en el canal verde (banda 4) del MODIS.

Por último, se ha valorado el índice compuesto NDDI (Normalized Difference Drought Index) propuesto por (Gu, 2007) y que tendría una respuesta mejor que el NDVI a la sequía en verano.

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (4)$$

2.2. Índice SPI

El índice SPI (Standardized Precipitation Index) es el índice de sequía pluviométrico más utilizado en EEUU (McKee, Doesken, & Kleist, 1993, 1995). El índice se calcula utilizando distintos periodos temporales de 1, 3, 6, 9, 12 o 24 meses de la lluvia en una determinada estación y el histograma de dicha variable se ajusta a una distribución gamma incompleta. La distribución gamma incompleta es una distribución combinada entre la probabilidad de ceros p_0 y la probabilidad dentro de una distribución gamma $\rho(x)$:

$$P(x) = p_0 + (1 - p_0) \cdot \rho(x) \quad (5)$$

Donde:

$$\rho(x) = \frac{x^{k-1} e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)} \quad (6)$$

Donde k es el factor forma y θ el factor de escala que definen la distribución y $\Gamma(k)$ es la función gamma evaluada en k . Tras esto, los valores se trasladan a una distribución normal de media 0 y desviación típica 1 y se emplea su distribución acumulada para determinar momentos de sequía. Para más información ver Edwards (1997) .

2.3. Índices PI5mm y PI10mm

Para tratar de explicar la aparición de sequía, una de las causas más importantes de daño en pastos, se proponen los índices PI5mm y PI10mm, estos están inspirados en una cadena de Markov. Los índices de tipo PIxmm asignan a cada intervalo de tiempo el número de intervalos previos, incluyendo el actual, cuya precipitación acumulada sea mayor o igual a x mm. Se ha puesto como tamaño del intervalo un tiempo de 8 días para coincidir con los datos de índices de vegetación que obtenemos del sensor MODIS cada 8 días. Los umbrales de precipitación propuestos son de 5 mm (en el caso del PI5mm) y de 10 mm (PI10mm), que son considerados normalmente como lluvia útil, es decir, una cantidad de precipitación menor se evapora sin llegar a revertir en el suelo y la vegetación. Debido a las lluvias torrenciales propias en la región, no es adecuado incluirlas en este índice, puesto que no toda la precipitación en estos eventos es absorbida por el suelo, y suponemos que se retiene un máximo de x mm para su uso por parte de la vegetación natural.

Estos índices siguen una distribución exponencial decreciente que se puede ajustar por el método de mínimos cuadrados ya que es una distribución discreta. Se calculan los distintos estimadores y_i :

$$y_i = A \cdot e^{-b \cdot i} \quad (7)$$

Donde i son todos los números naturales entre 1 y el máximo de la distribución y A y b son los coeficientes antes obtenidos. Una vez se obtienen los distintos y_i se procede a identificar los estados de sequía, para ello se calcula la distribución teórica acumulada y_T como:

$$y_T = \sum_{i=1}^{i_{max}} y_i \quad (8)$$

Siendo i_{max} el valor máximo de la distribución. A continuación, se calculan los porcentajes acumulados p_j para cada valor de i :

$$p_j = 100 \cdot \sum_{i=j}^{i_{max}} \frac{y_i}{y_T} \quad (9)$$

Para establecer la probabilidad de sequía se compara cada valor p_j con el porcentaje de probabilidad acumulada t_j que debería tener. Ya que cuanto mayor es j mayor sequedad hay, para facilitar la comparación se realiza el cambio $t_j = 100 - p_j$.

A continuación, a cada t_j se le debe asignar un valor de sequía, comparándolo con los valores de la Tabla 1, asignando un nivel de sequía equivalente al mayor nivel que pudiera tener dicho t_j , ya que la variable es discreta.

Como ejemplo práctico, supongamos que $t_{14} = 98$ y $t_{13} = 97$, el nivel de sequía de $j = 14$ sería automáticamente 3 ya que toda su distribución es mayor que 97,72. El nivel de sequía de $j = 13$ sería 2 ya que $t_{13} < 97,72$.

Los porcentajes de probabilidad acumulada se calculan según el área de una gaussiana de media 0 y desviación típica 1, siguiendo la metodología del SPI estandar.

Nivel de sequía	Distribucion acumulada (%)	Estado
3	100	Extremadamente seco
2	97,72	Gravemente seco
1	93,32	Moderadamente seco
0	84,13	Aproximadamente normal
0	15,87	Moderadamente húmedo
0	6,68	Muy húmedo
0	2,28	Extremadamente húmedo

Tabla 1. Tipo de sequía a partir del PI5mm o PI10 mm en función de la probabilidad acumulada. Cuanto mayor es el índice mayor sequedad se presenta. La proporción teórica de distribución acumulada ha sido extraída de Donaire (2007).

2.4. Sensor MODIS

Para el cálculo del NDVI se ha utilizado el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) presente en el satélite Terra (EOS AM-1) puesto en órbita por la NASA

el 18 de diciembre de 1999. Se emplea este satélite por su alta resolución ($500 \times 500 m^2$) y por ser datos de libre descarga.

Los satélites suelen reconocer 5 niveles distintos en función del nivel de procesamiento de la información recogida. El nivel 0 son los datos tal y como los toma el detector. El nivel 1 incluye una calibración radiométrica. El nivel 2 son datos de nivel 1 con una corrección por la influencia de la atmósfera de modo que proporcionan datos de reflectancia a nivel de suelo. Los datos de nivel 3 son datos de nivel 2 georreferenciado y suelen estar promediados. Los datos de nivel 4 tienen algún procesamiento adicional. En este trabajo hemos usado el producto MOD09A1 (LP DAAC, 2014) que incluye datos de nivel 3.

El producto utilizado incluye información de nivel 3 de siete bandas del espectro: banda 1 (620-670 nm), banda 2 (841-876 nm), banda 3 (459-479 nm), banda 4 (545-565 nm), banda 5 (1230-1250 nm), banda 6 (1628-1652 nm) y banda 7 (2105-2155 nm). El producto incluye el filtrado de absorción y el scattering de la atmósfera así como los efectos provocados por gases y aerosoles. MD09A1 proporciona imágenes georreferenciadas con una resolución del píxel de 500x500 metros. Cada dato es la composición de la medición con mayor precisión de cada 8 días. Cada año incluye, de esta manera, 46 valores distintos con fechas bien definidas. Para este trabajo se han tomado los datos de 2001 a 2012, ambos inclusive. Originalmente se tomaron también los datos de 2013 y 2014, sin embargo, estos datos debieron ser eliminados de la muestra al encontrarse comportamientos anómalos que indican que no se encuentran debidamente relacionados con el resto. Las bandas empleadas en el cálculo del NDVI son la 1 y la 2.

MODIS emplea un sistema de proyección cartográfica sinusoidal dividiendo la superficie terrestre en una rejilla de 35x17 teselas rectangulares. Las 4 teselas que contienen a España son h17v04, h17v05, h18v04 y h18v05.

En este trabajo se ha utilizado el sistema de proyección UTM30 y el modelo geoide WGS 84 que están entre los más implantados. Se han extraído los datos en formato GeoTIFF tras aplicar los conversores adecuados entre ambos sistemas de referencia.

2.5. Selección de áreas de estudio.

Para nuestro estudio se han elegido cuatro zonas homogéneas evitando cultivos de regadío, cuadradas de 2500 metros de lado cercanas a una estación pluviométrica. Las tres primeras zonas corresponden a pastos o terreno de secano que puede emplearse como pasto, mientras que la cuarta se trata de un bosque. Las distintas estaciones pluviométricas pertenecen al Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla-La Mancha (SIAR) o al Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM). Las zonas y la estación pluviométrica asociadas a cada una de ellas se detallan en la Tabla 2 en coordenadas UTM referidas al huso 30. En la Figura 2 se muestra la localización geográfica de las zonas en el mapa de Murcia. En las Figuras 3 a 6 se muestra cada zona con su respectiva estación. Aunque puedan parecer que las regiones tienen estructura trapezoidal es un efecto de la proyección cartográfica. Las figuras han sido obtenidas utilizando *GoogleEarth*.

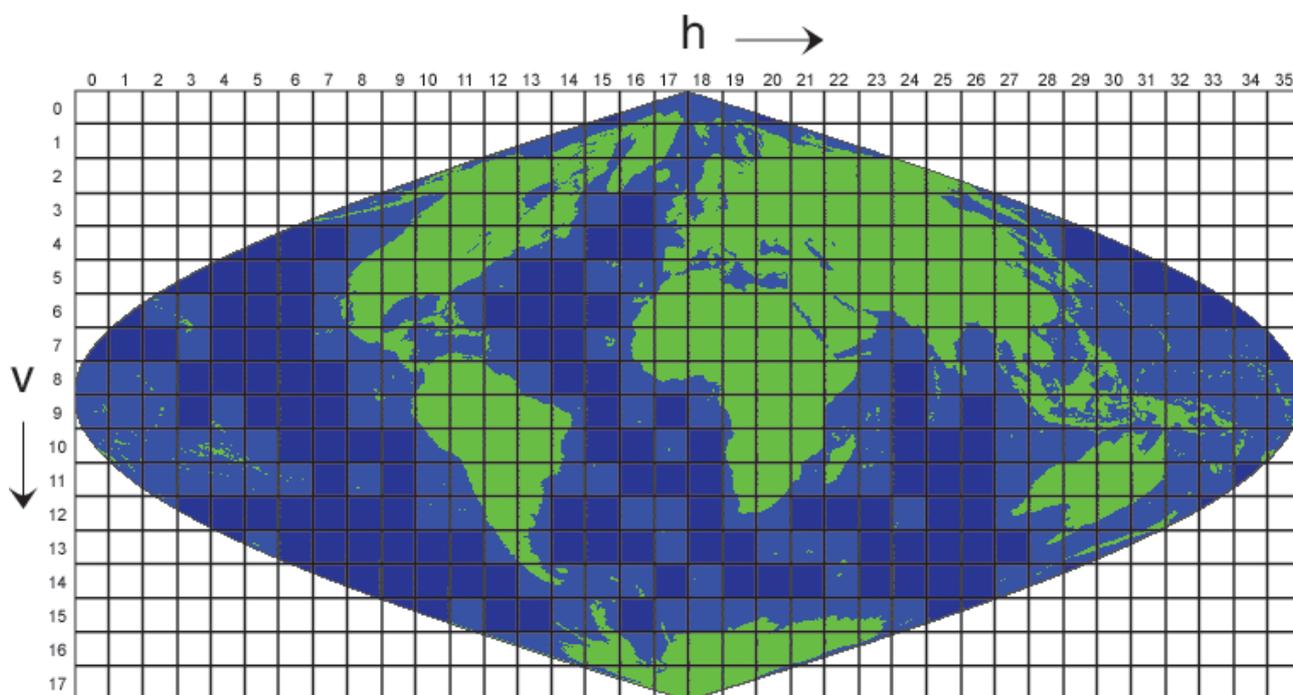


Figura 1. Proyección cartográfica que utiliza el sensor MODIS con la división de las teselas correspondiente. Imagen extraída de la página web de la Universidad de Hamburgo

http://icdc.zmaw.de/fileadmin/user_upload/icdc_Bilder/MODIS_sinusoidal_grid_tiles_colored.gif

Zonas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
x_{min} (m)	635796	660520	650064	614504
x_{max} (m)	638296	663020	652564	617004
y_{min} (m)	4273396	4284420	4225985	4219731
y_{max} (m)	4275896	4286920	4228485	4222231
Estación	AL-06 (SIAR)	AL-10 (SIAM)	CI-32 (SIAR)	CR-32 (SIAM)
$x_{estacion}$ (m)	630946	675585	652564	615466
$y_{estacion}$ (m)	4276000	4289270	4228485	4218939

Tabla 2. Coordenadas de las esquinas de las cuatro Zonas de estudio con su respectiva estación pluviométrica con sus coordenadas.



Figura 2. Localización de las cuatro zonas y sus respectivas estaciones en el mapa de Murcia. Fuente de la imagen *GoogleEarth*.



Figura 3. Zona 1 y estación AL06. Fuente de la imagen *GoogleEarth*. Comarca Altiplano.

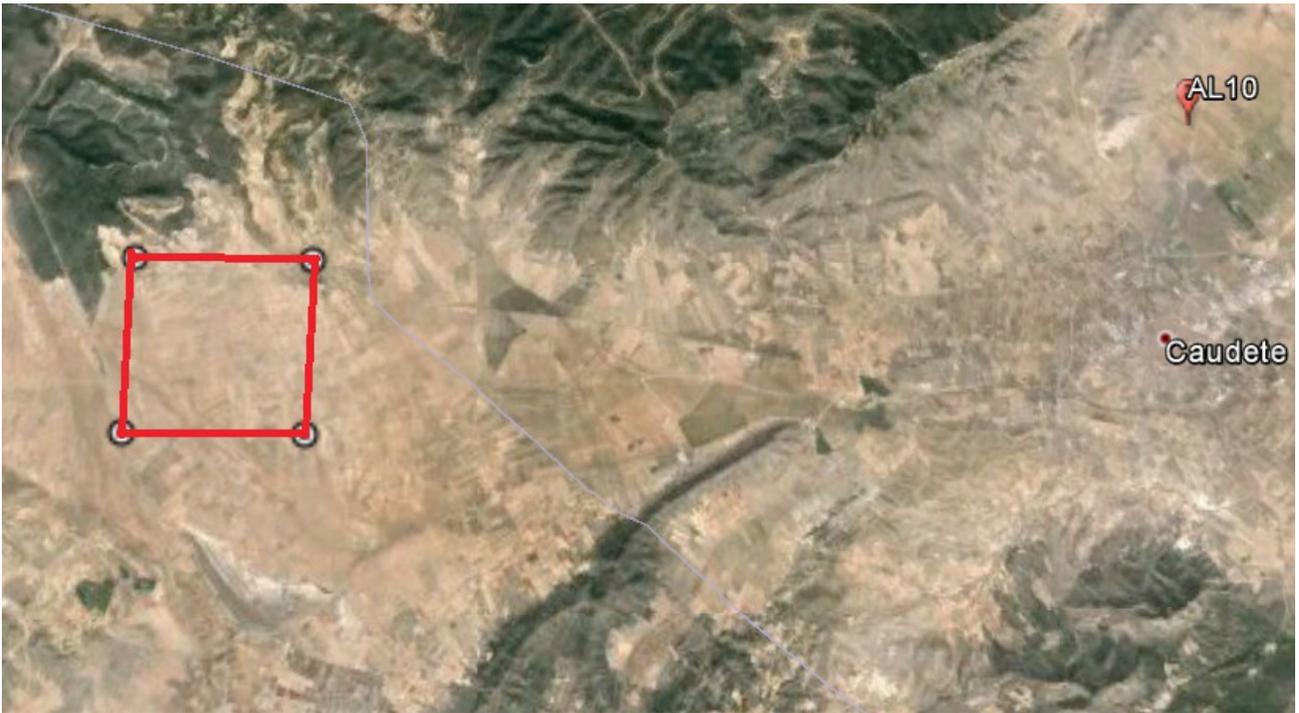


Figura 4. Zona 2 y estación AL10. Fuente de la imagen *GoogleEarth*. Comarca Altiplano.



Figura 5. Zona 3 y estación CI32. Fuente de la imagen *GoogleEarth*. Comarca Vega del Segura.



Figura 6. Zona 4 y estación CR32. Fuente de la imagen *GoogleEarth*. Comarca Noroeste.

2.6. Estaciones pluviométricas

Como fuente de datos climáticos se han utilizado dos pares de estaciones del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla-La Mancha (SIAR) o del Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM). En estas estaciones se han buscado cinco variables:

- Cantidad de agua precipitada. (mm)
- Temperatura media. (°C)
- Temperatura máxima (°C)
- Temperatura mínima (°C)
- Evapotranspiración del cultivo de referencia (Eto)

La ETo es la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto del cultivo de referencia, que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua. Se mide en milímetros (como la cantidad de agua precipitada).

En las estaciones del SIAR (<http://crea.uclm.es/siar/metodologia/eto.php>) para calcular la evapotranspiración se utiliza el método de Penman-Monteith mejorado por Allen (1998) y basado en la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (10)$$

Donde λ el calor latente de vaporización, Δ la pendiente de la curva que relaciona la presión del vapor con la temperatura del aire, R_n la radiación neta de la superficie de cultivo, G el flujo térmico del suelo, ρ_a la densidad de aire seco a presión constante, c_p el calor específico del aire, $e_s - e_a$ el déficit de presión de vapor, γ la constante psicrométrica, r_s es la resistencia superficial del cultivo de referencia y r_a su resistencia aerodinámica. Donde la descripción de cada variable se encuentra detallada en la referencia mencionada así como en la página web del servicio.

En las estaciones del SIAM se utiliza para dicha estimación el método del "evaporímetro de clase A" (Doorenbos, Pruitt, 1977) que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ET_o = k_p \cdot E_0 \quad (11)$$

Donde k_p el coeficiente del tanque que depende de las condiciones de cobertura del suelo donde se ubica el tanque, velocidad del viento y humedad relativa y E_0 es la evaporación en el tanque.

Todas estas variables se han tomado con un dato diario desde el 1 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre 2014. Se han tomado también datos del mes de diciembre del año 2000 por si era necesario para calcular los índices PI5mm y PI10mm, si bien en no todas las estaciones se ha podido seleccionar el mes entero ya que dos de ellas se pusieron en funcionamiento en dicho mes.

2.7. Filtrado de datos del sensor MODIS

A pesar de las correcciones que el propio producto MOD09A1 incorpora para eliminar los efectos de absorción y scattering atmosférico, eventualmente los datos requieren un filtrado mayor para eliminar datos que claramente corresponden a ruido debido a nubosidad o nieve y disponer de una bondad mayor a los respectivos ajustes después realizados. Una característica de los pastos es que su color refleja su actividad fotosintética directamente, es decir, tendrá una gama de colores entre el amarillo pajizo propio de los pastos secos hasta el verde, muestra de alta actividad fotosintética. En la muestras, con relativa frecuencia aparecen píxeles de un color grisáceo, estos datos son debidos a que la cantidad de nubes en el periodo de la muestra ha sido tan alta que ha impedido que en el píxel se coloque un dato relativo al píxel a nivel de suelo.

Un método utilizado (Martín, 2014) para determinar qué píxeles deben ser corregidos consiste en utilizar el sistema de color HSL. Para ello se toman la banda 1 (Rojo, 620-670 nm), banda 3 (Azul, 459-479 nm) y banda 4 (Verde, 545-565 nm) y al pasar al sistema HSL podemos establecer un rango de grises, de modo que se eliminen dichos píxeles. El modelo de color HSL (Levkowitz, 1997) es una transformación geométrica del sistema cartesiano RGB a un sistema de coordenadas cilíndrico inspirado en la rueda de color. Las tres coordenadas que definen el modelo son:

- Saturación (S): es la coordenada ρ del sistema cilíndrico y toma valores en el intervalo $[0, 1]$. Define la pureza del color, los colores puros tienen $S=1$ mientras que los colores neutros, acromáticos o grisáceos toman valores bajos cercanos a 0.

- Luminosidad (L): es la coordenada z del sistema cilíndrico y toma valores en el intervalo $[0, 1]$.

Se corresponde a la claridad u oscuridad de un color siendo el 1 el valor de L del color blanco y 0 el del negro. Los colores puros se encuentran en $L=1/2$

- Matiz (H): es la coordenada θ y corresponde a la longitud de onda del color dominante, siendo 0° el rojo, 120° el verde y 240° el azul.

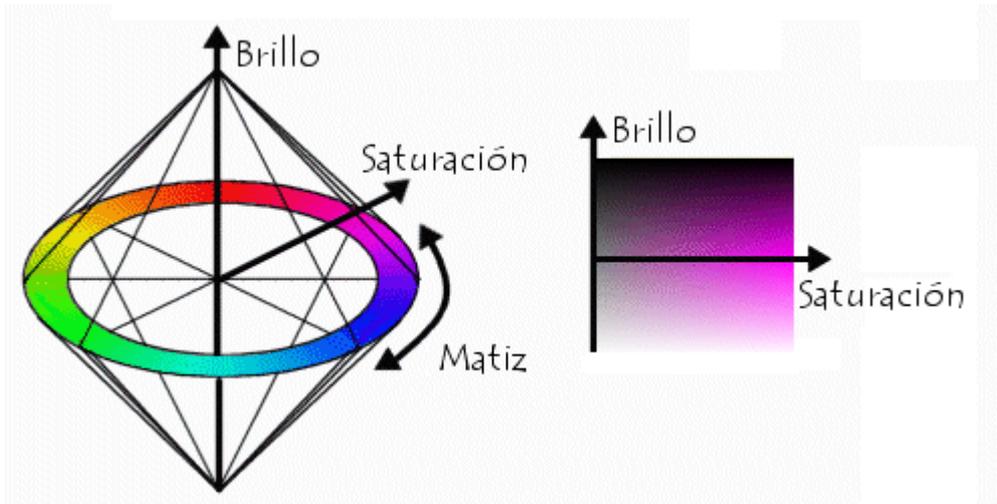


Figura 6. Diagrama de las coordenadas del sistema HSL. Imagen obtenida de <http://es.ccm.net/contents/727-codigo-hsl>

$$H = \begin{cases} \text{no definido,} & \text{si } MAX = MIN \\ 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 0^\circ, & \text{si } MAX = R \\ & \text{y } G \geq B \\ 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 360^\circ, & \text{si } MAX = R \\ & \text{y } G < B \\ 60^\circ \times \frac{B-R}{MAX-MIN} + 120^\circ, & \text{si } MAX = G \\ 60^\circ \times \frac{R-G}{MAX-MIN} + 240^\circ, & \text{si } MAX = B \end{cases}$$

$$L = \frac{1}{2}(MAX + MIN) \tag{12}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{if } MAX = MIN \\ \frac{MAX-MIN}{MAX+MIN} = \frac{MAX-MIN}{2L}, & \text{if } L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX-MIN}{2-(MAX+MIN)} = \frac{MAX-MIN}{2-2L}, & \text{if } L > \frac{1}{2} \end{cases}$$

Donde R, G y B son los valores de reflectancia de las respectivas bandas roja, verde y azul antes detalladas y donde:

$$\begin{aligned} MAX &= \max(R, G, B) \\ MIN &= \min(R, G, B) \end{aligned} \quad (13)$$

En este trabajo se ha observado que los valores grises son además estadísticamente anómalos, es decir, tienen una gran desviación respecto a la tendencia que la señal tiene en ese momento, se ha realizado otro tipo de filtrado mediante un criterio estadístico, ya que los valores anómalos se pueden ver como descensos acusados del NDVI. Para este criterio se deben seguir una serie de pasos que se detallan a continuación:

- 1) Se calcula la dispersión estandar de la serie histórica de cada píxel.
- 2) Se realiza una media móvil de cinco datos centrandose en el dato que se quiere comprobar. Se toman cinco datos ya que debe ser un número impar (al estar centrado en el dato que se estudia), suficientemente bajo para no suavizar las propias caídas en la tendencia de la señal y suficientemente alto para suavizar los datos anómalos. Se puede tomar 7 también como valor para el cálculo de la media móvil.
- 3) En aquellos puntos en los que la diferencia entre la media móvil del punto y el dato sea, en valor absoluto, mayor que 1,5 desviaciones típicas se toma el valor de la media móvil en vez del valor del dato. En cualquier otro caso se toma el valor del dato.

2.8. Estandarización de datos pluviométricos

Los datos de evapotranspiración deben seguir una serie de ajustes para poder compararse con los periodos de recogida de datos. Esta normalización requiere que a cada fecha MODIS se le asocien sus respectivos ocho días en la estación pluviométrica calculándose las siguientes magnitudes:

- 1) Evapotranspiración total de dicho periodo.
- 2) Precipitación total de dicho periodo.
- 3) Temperatura media en dicho periodo.
- 4) Temperatura máxima absoluta entre todos los días.
- 5) Temperatura mínima absoluta entre todos los días.

Este sistema tiene problemas en cuatro supuestos para el cálculo de la evapotranspiración total y la precipitación total de cada periodo debido a que el número de días no es divisible por 8:

- 1) El periodo 46 comprende 5 días en vez de 8.
- 2) En los años bisiestos el día 29 de febrero se añade al periodo 8 teniendo este periodo 9 días.
- 3) Cuando no hay datos de un determinado periodo para algunos de sus días.
- 4) Cuando no hay datos de ningún día de un determinado periodo.

En los casos de 1 a 3 se puede estandarizar la muestra multiplicando la evotranspiración total y la precipitación total de los días disponibles por $8/n$ donde n es la cantidad de días disponibles (en el segundo supuesto n es 9). En el cuarto caso se opta por realizar una interpolación lineal para hallar el dato apropiado.

2.9. Test normalidad de Shapiro-Wilk

Para comprobar la bondad de ajuste a la normal en este estudio se ha utilizado el test de Shapiro-Wilk es un test que estima la probabilidad de que la distribución evaluada sea una distribución normal. Este test (Razali, 2011) es el que mejor correlación tiene para muestras menores de 5000 elementos, como es el caso. El test (Shapiro, 1965) consiste en, tras ordenar los datos de la muestra de menor a mayor, realizar el cálculo del estadístico W :

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

Donde y_i es cada uno de los datos de la muestra, \bar{y} es la media muestral, n es el número de datos de la distribución y $\mathbf{a}_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{\mathbf{m}^T \mathbf{V}^{-1}}{(\mathbf{m}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{m})^{1/2}}$, donde

$\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_n)^T$ son los valores esperados de una distribución estadística de valores independientes e idénticos distribuidos siguiendo una gaussiana y \mathbf{V} es la matriz de covarianza del orden del número de datos. Cuanto más cercano sea el valor W a 1 mayor es el ajuste a la normal. El test fue mejorado por Royston (Royston, 1992) para muestras hasta 5000 elementos. El programa empleado para ajustar la distribuciones de cada uno de los periodos y cada una de las zonas fue desarrollado por Ahmed Ben Sada (Department of Finance, IHEC Sousse – Tunisia) descargado de:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13964-shapiro-wilk-and-shapiro-francia-normality-tests/content/swtest.m>

2.10. Método de ajuste a distribuciones de probabilidad

Para ajustar las distribuciones de probabilidad del SPI a una distribución gamma incompleta se ha empleado el método de máxima verosimilitud. Este método (Larson, 1982) emplea una función de densidad conjunta de n variables auxiliares $X_1 \dots X_n$ dependientes de los parámetros de la distribución, en este caso los factores de forma y escala, k y θ , sobre los que se maximizará la función de densidad conjunta para el caso de una realización $x_1 \dots x_n$. La función de verosimilitud de las n variables auxiliares $X_1 \dots X_n$ es la función de densidad de probabilidad conjunta de las n variables $f(\mathbf{x}, \mathbf{t})$, donde \mathbf{t} es el conjunto de parámetros de la distribución y \mathbf{x} es el conjunto de las variables $x_1 \dots x_n$. Si \mathbf{x} es una muestra aleatoria de funciones de probabilidad $f(\mathbf{x}, \mathbf{t})$, la función de verosimilitud sería:

$$L = f(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \mathbf{t}) \quad (15)$$

Los valores correctos de la distribución son aquel conjunto de parámetros \mathbf{t} que maximizan la función de verosimilitud de la muestra \mathbf{x} . En esta práctica se emplea el programa de Saa Requejo (1991) utilizando el método de (Mielke 1975, 1976) que utiliza el algoritmo de la función de verosimilitud para su maximización. Las principales

características de este estimador son:

- Invarianza.
- Consistencia.
- Inssegado asintóticamente.
- Normalidad asintótica.

Para comprobar la bondad de ajuste de dicha distribución a una función gamma se han empleado dos métodos: el test χ^2 y el método de Kolmogorov-Smirnoff (Larson, 1982). El test χ^2 consiste en que, a partir de la distribución de probabilidad anterior $f(x, t)$ y la función de probabilidad teórica de la variable auxiliar X agrupada en k clases con n_i datos en cada clase i , se evalúa el estadístico:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (16)$$

Donde $e_i = n \cdot P_i$ es la frecuencia esperada de la clase i , siendo P_i la probabilidad de que la variable auxiliar X tome valores dentro del intervalo definido por la clase i . El estadístico debe evaluarse según que nivel de significación quiera darse a la correlación entre la distribuciones real y los estimadores.

El método de Kolmogorov-Smirnoff consiste en evaluar la muestra mediante un estadístico que se calcula como:

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} (|\hat{F}_n(x_i) - F_o(x_i)|) \quad (17)$$

Donde x_i es el i -ésimo valor observado de la muestra (habiendo ordenado los valores de menor a mayor), $\hat{F}_n(x_i)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales a x_i y $F_o(x_i)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales a x_i cuando la distribución de probabilidad teórica es cierta.

2.11. Seguro agrario indexado.

El seguro de compensación por pérdida en pastos del Sistema Español de Seguros Agrarios Combinados emplea la teledetección con índices de vegetación (MAGRAMA, 2013a) para compensar la cantidad y calidad de pasto en el territorio nacional (excepto Baleares). Este seguro es el principal instrumento para hacer frente al gasto del suplemento alimenticio del ganado en época adversa.

El MAGRAMA (2013a) decide cuando compensar el evento de pérdida en pasto en función de los valores que toma el índice de vegetación NDVI en un periodo de tiempo, por lo que pertenece al tipo de seguro agrario indexado. El seguro toma los datos del sensor MODIS del satélite TERRA.

El objeto del seguro es compensar a ganaderos por las pérdidas de pasto ocasionadas por eventos adversos. Con este objetivo el seguro define lo siguiente:

- Zona homogénea: cada Comarca Agraria será una zona homogénea.

- NDVI medio: es el índice NDVI decenal (cada 10 días), calculado para cada zona homogénea de pastoreo, como media aritmética de los NDVIs de la serie 2000 a 2011 de MODIS.
- NDVI actual: Es el índice NDVI decenal del periodo de garantía, calculado para cada zona homogénea de pastoreo, a partir del Máximo Valor Compuesto Decenal (MVDC).
- NDVI garantizado (umbrales): se distinguen dos estratos de garantía:
 1. Estrato 1: NDVI medio decenal, calculado para cada zona homogénea de pastoreo, menos 0.7 veces la desviación típica del mismo, para la misma decena.
 2. Estrato 2: NDVI medio decenal, calculado para cada zona homogénea de pastoreo, menos 1.5 veces la desviación típica del mismo, para la misma decena.

Todos los NDVI medio como su desviación típica se multiplicarán por el factor 0.99 a efectos del cálculo del NDVI garantizado.

- Máximo valor compuesto decenal (MVDC): es el valor máximo de las lecturas diarias de cada decena de días para cada píxel. Representa el indicador de actividad de los pastos en cada una de las decenas del año, eliminando los efectos de las nubes, las discrepancias producidas por la diferente iluminación de cada uno de los diez días y demás efectos perturbadores.

El seguro establece cinco opciones diferentes de contratación. Salvo el caso especial de franquiciado, todas las opciones comparten la siguiente definición de suceso mínimo indemnizable: aquel en el que el NDVI actual sea inferior al NDVI garantizado en más de 3 decenas a lo largo del periodo de garantía, siendo esta una definición implícita de sequía.

En el caso específico de Murcia (MAGRAMA, 2013b) están disponibles cinco opciones de seguro que a continuación se detallan con sus periodos de aplicación:

- Opción A: 3 decenas.
- Opción B: igual o superior al 10% del capital asegurado.
- Opción C: 3 decenas.
- Opción D: 3 decenas y franquicia del 20%.
- Opción E: igual o superior al 10% del capital asegurado y franquicia del 20%.

En este estudio se han tomado los datos de todo el año para realizar la comparativa con los índices aquí desarrollados.

2.12. Análisis factorial exploratorio

El análisis factorial exploratorio (Exploratory Factor Analysis, EFA) (DeCoster, 1998) es un método estadístico empleado fundamentalmente en psicología, aunque también en otras disciplinas científicas, que permite agrupar variables semejantes por grupos. Al aplicar este método se dispone de n variables independientes y se parte de la hipótesis de que pertenecen a m variables dependientes llamadas factores, cuyo número debe estimar el investigador ayudándose de condiciones estadísticas. El método obtiene la matriz de correlación de todas las variables y realiza una rotación por distintos métodos para

establecer un valor de covarianza óptimo en el que los factores tengan grupos de variables claramente separados. Esta parte puede realizarse por distintos métodos, en este caso se ha empleado la sentencia de Matlab *factoran* que utiliza el método *varimax* (Kaiser, 1958). El resultado del análisis factorial es una matriz $n \times m$ donde en cada columna se encuentra un coeficiente que correlaciona cada variable con el factor correspondiente. Este valor va de -1 a 1, donde cuanto mayor sea su valor absoluto mayor nivel de correlación se tiene entre variable y factor. Como ejemplo ilustrativo de como funciona el método, si en un instituto existieran n materias, cuyas notas serían las variables independientes, el investigador podría suponer que las notas de cada estudiante estarían relacionadas con $m=2$ tipos de inteligencia (verbal y matemática), que serían los factores, de modo que realizaría un análisis factorial exploratorio para saber cómo se relacionan las notas de las asignaturas con cada factor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Filtrado del índice NDVI. Comparativa entre métodos.

Para seleccionar el método de filtrado entre el método HSL y el método de las medias móviles se ha realizado un conteo de la cantidad de datos sustituidos (Tabla 3) por el método de las medias móviles con una dispersión estandar de 2 sigmas y por el método del color HSL, dando al gris un valor de saturación menor o igual que 0.15 (Martín, 2014) . La media móvil se calcula con 5 datos, estando centrada en el dato actual. También se muestran los datos coincidentes en ambas sustituciones.

Zona	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Cantidad sustituciones HSL	162	161	264	373
Cantidad sustituciones media móvil	209	194	141	274
Cantidad sustituciones coincidentes	117	115	95	232

Tabla 3. Cantidad de sustituciones por el método de las medias móviles ($|\Delta NDVI| < 2$) y por el método del color HSL ($Gris \rightarrow S \leq 0.15$) y datos coincidentes para cada zona.

Como se puede comprobar hay una serie de ventajas e inconvenientes para cada método, el método de las medias móviles es más rápido de realizar para cualquier ordenador, dispone de un valor de sustitución para aquellos píxeles grises en el orden de magnitud de la señal de NDVI, y no requiere la descarga de los datos relativos a las bandas 3 y 4 del sensor MODIS, aunque puede minimizar las oscilaciones extremas de NDVI que se produzcan. Sin embargo, el método HSL está más relacionado con el sentido físico del filtrado, pero falla al no filtrar los picos hacia valores altos de NDVI.

Para el resto de este trabajo, al estar el método HSL mejor fundado en las bases físicas del proceso que el de las medias móviles, se han tomado como valores a sustituir los indicados por dicho método, eligiéndose como valor de sustitución los valores obtenidos en el método de las medias móviles, a lo que llamaremos método combinado. En resumen, ambos métodos tienen una serie de ventajas e inconvenientes aunque para poder determinar uno de ellos como el óptimo es necesario un estudio más detallado de la correlación que tienen entre sí, ajustando la tolerancias del método de las medias móviles adecuadamente, teniendo en cuenta que cuanto más baja sea más datos coincidirán en ambos métodos pero menos respetará la muestra original al reducirse el umbral en el que un dato se considera anómalo.

En la Figura 7 se muestra la comparativa entre las medias olímpicas de la señal original (7.A), la media móvil (7.B) y los dos métodos de filtrado usando como ejemplo la Zona 3. La media olímpica de cada periodo se calcula realizando la media de los 25 píxeles de cada momento histórico eliminando el mayor y menor dato de la misma. Se puede comprobar que el método de filtrado conjunto (7.D) respeta la muestra más la muestra

original que el método de las medias móviles (7.C) eliminando todas las diferencias acusadas de NDVI debidas a nubosidad y sustituyendolos por datos coherentes con el resto de la muestra.

Se utilizará, por tanto, el método combinado porque el HSL define mejor los píxeles mientras que la media móvil parece un valor de sustitución correcto. Se ha empleado el mismo método de filtrado para NDWI y NDWU.

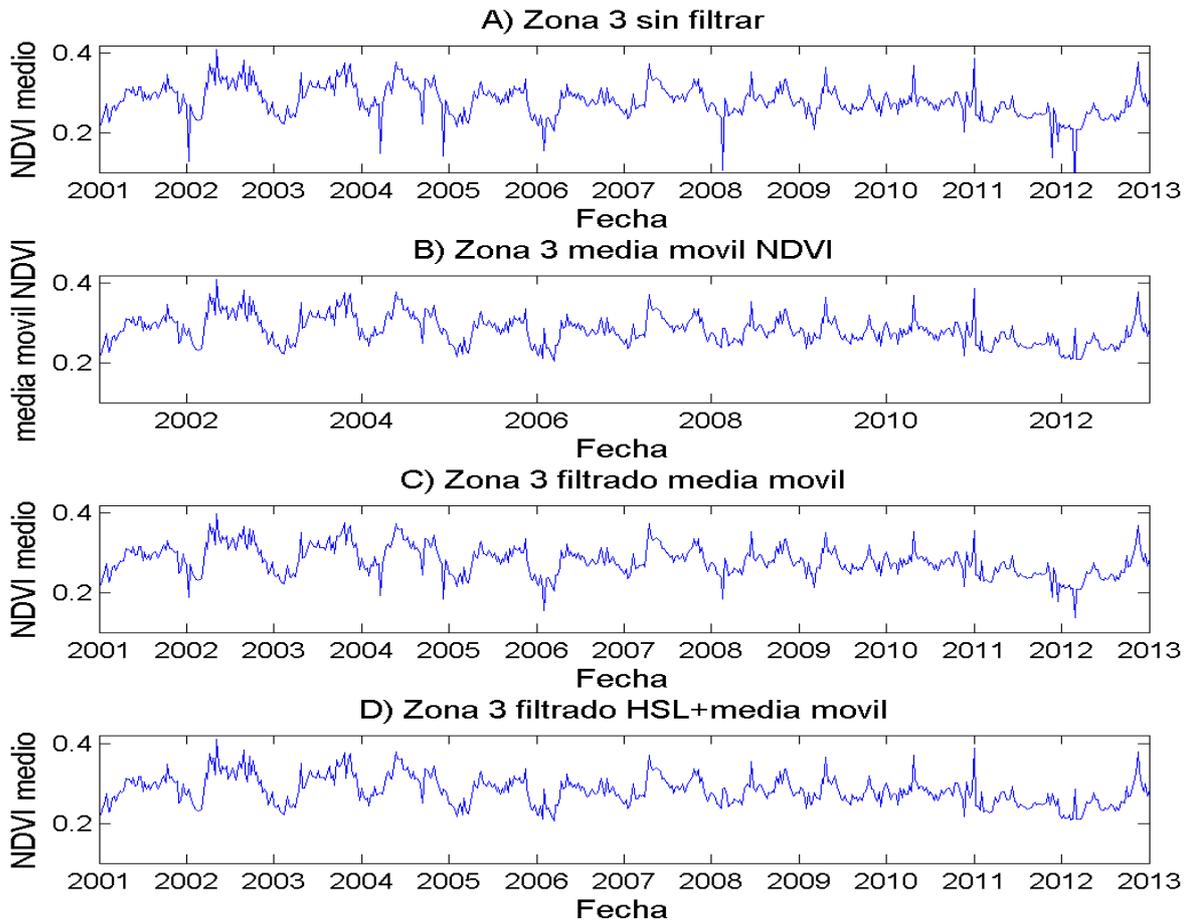


Figura 7. Filtrado de NDVI de la Zona 3 (comarca Vega del Segura) según los distintos métodos (ver texto).

3.2. Comparativa entre índices de vegetación.

Realizamos ahora una comparación entre los distintos índices de vegetación calculados con el fin de evaluar sus diferencias y similitudes. En la Tabla 4 se ha estudiado la correlación mediante una regresión lineal de los índices NDVI y NDWU, que representan los ejes x e y respectivamente.

Región	Pendiente	Ordenada origen	Coefficiente R^2
Zona 1	-0.8354 ± 0.0191	-0.1777 ± 0.0034	0.7773
Zona 2	-0.7884 ± 0.0148	0.1712 ± 0.0031	0.8384
Zona 3	-0.8290 ± 0.0104	-0.1310 ± 0.0030	0.9199
Zona 4	-0.7287 ± 0.0075	-0.1452 ± 0.0032	0.9447

Tabla 4. Regresión lineal entre los índices NDVI y NDWI.

Todas las pendientes son negativas, por lo que muestran una correlación inversa. Se observa también una clara dicotomía entre las Zonas 1 y 2, con coeficientes de correlación aceptables pero menores que en las Zonas 3 y 4. En la Figura 8 se muestran las series históricas de ambos índices en las cuatro Zonas. Se puede comprobar que las caídas de NDVI coinciden con subidas de NDWI y viceversa. En aquellos puntos en los que existe divergencia es debida a un salto más acusado que en el otro índice pero con la misma tendencia. Esta proporción inversa no se mantiene constante a lo largo de la serie y, por ello, el coeficiente R^2 es más bajo. Esto hace pensar que el índice NDWI no es útil como índice separado, ya que no proporciona información adicional, pero si sería útil como sistema para detectar valores anómalos del índice NDVI.

En la Figura 9 se muestra la serie temporal de NDVI y NDDI. Las figuras de las 4 Zonas se encuentran a la misma escala. Se observa que el índice NDDI (ver Ecuación 4) en las Zonas 1 y 2 tiene una escala que no corresponde con los valores aceptables de la variable ya que debería estar comprendido entre -1 y 1. Esto es debido a que en regiones áridas su denominador pasa a estar muy próximo a cero, disparándose el valor de la variable, el índice NDVI toma valores muy bajos mientras que el NDWI toma valores negativos. Esto se debe a que este índice fue diseñado para las Grandes Llanuras (Gu, 2007), donde ambos índices toman valores más altos, sin embargo, en nuestra región es inaplicable.

En la Figura 10 se muestran las series temporales de NDVI y NDWI. Se observa que los índices no tienen correlación entre sí mostrando un coeficiente R^2 del orden de 0.2 en una de las zonas y menor en el resto. Esto es debido a que cada uno de los índices tiene un significado físico distinto, ya que el índice NDVI representa la actividad fotosintética y el NDWI el almacenamiento de agua en las cubiertas vegetales (Gao, 1996).

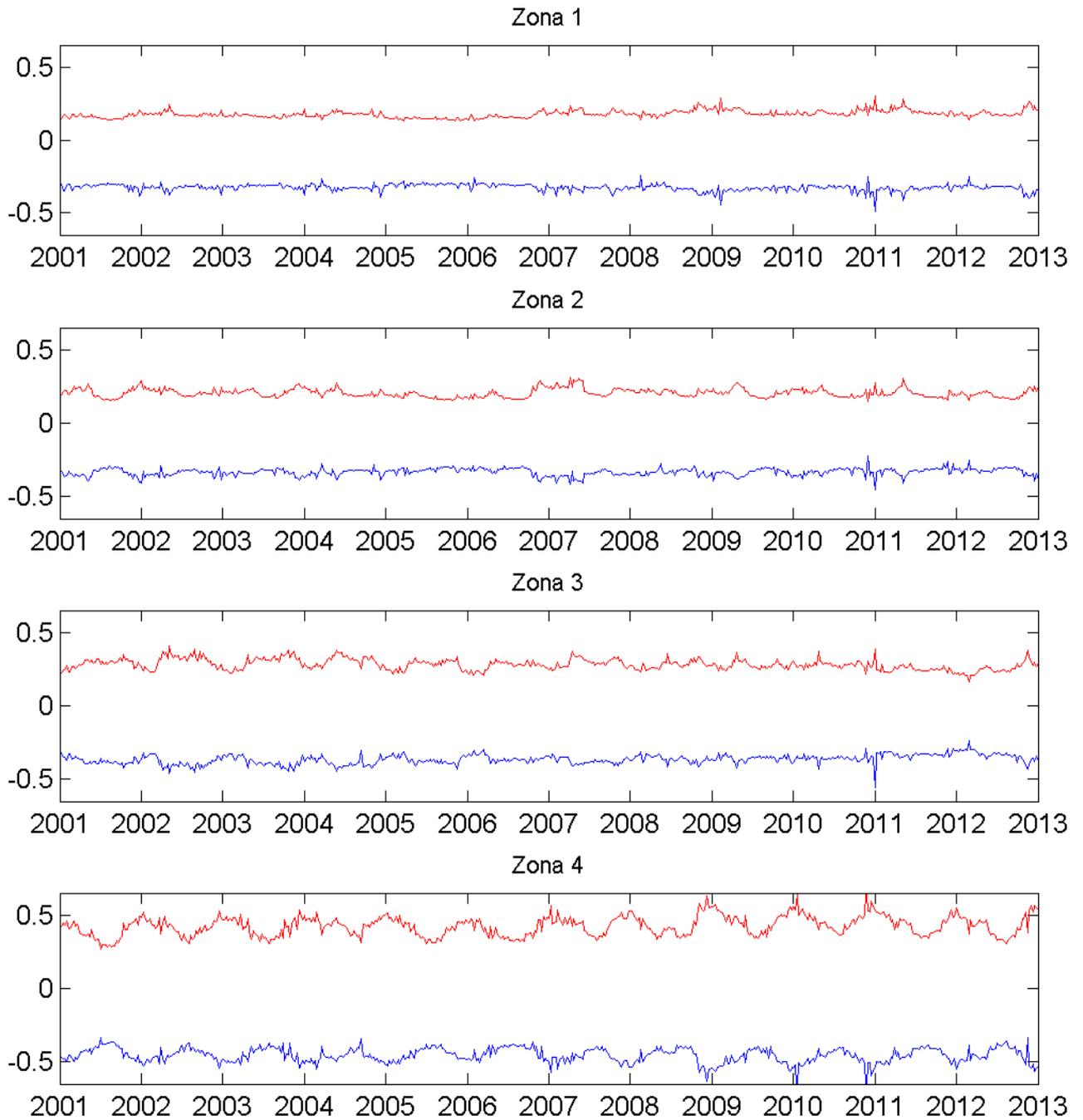


Figura 8. Serie temporal de NDVI (rojo) y NDWU (azul) en las 4 Zonas.

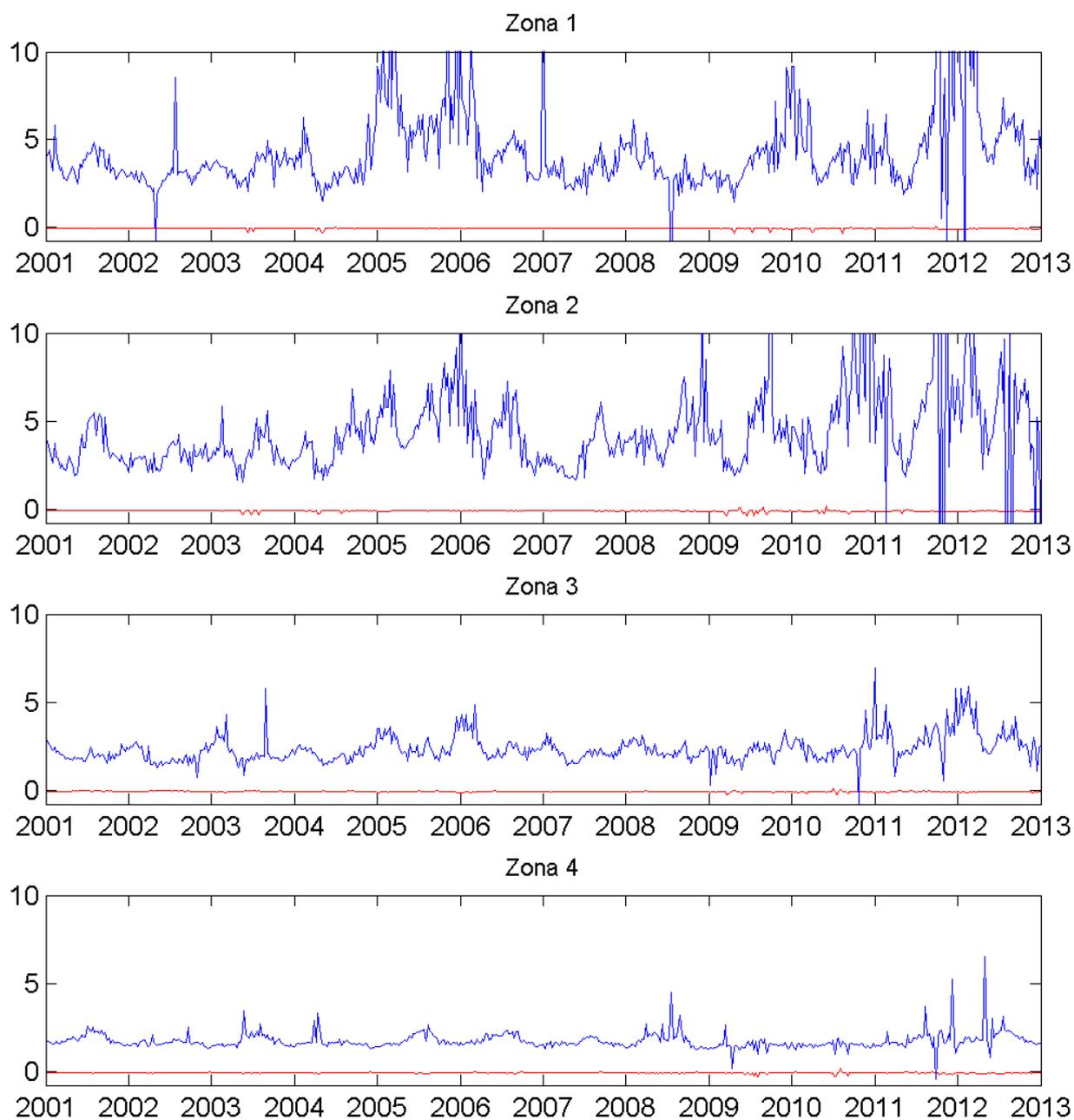


Figura 9. Serie temporal de NDDI (azul) y NDWI (rojo) en las 4 Zonas.

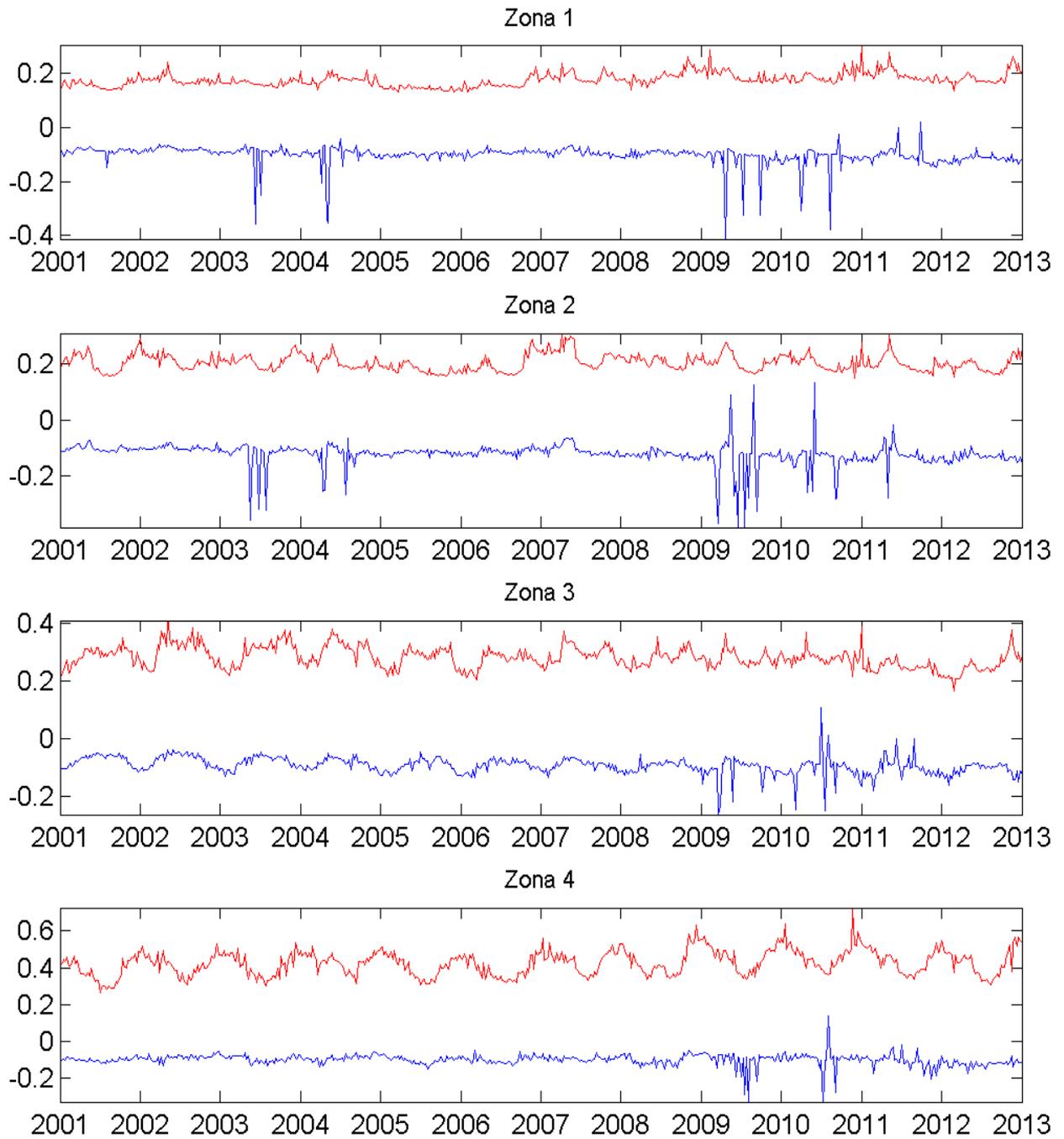


Figura 10. Series temporales de NDVI (rojo) y NDWI azul en las 4 Zonas.

3.3. Ajuste a la normal de NDVI

Una vez obtenidas las series de NDVI y filtradas, pasamos a estudiar las distribuciones estadísticas que presentan. Para ello se ha realizado un estudio de la bondad de ajuste a la normal de las distribuciones de NDVI de cada periodo de 8 días que utiliza el sensor MODIS. Este estudio se encuentra recogido en la Tabla 5, donde se muestra el número de distribuciones en cada intervalo de bondad de ajuste a la normal; los intervalos de bondad de ajuste se han tomado de (Peters, 2002). Los resultados detallados para cada zona y cada periodo se encuentran en el Apéndice 1.

Bondad de ajuste a la normal	Probabilidad	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Muy pobre	$0 \leq p < 0.05$	45	44	41	25
Pobre	$0.05 \leq p < 0.25$	1	2	4	17
Media	$0.25 \leq p \leq 0.75$	0	0	1	3
Buena	$0.75 < p \leq 0.95$	0	0	0	1
Muy buena	$0.95 < p \leq 1$	0	0	0	0

Tabla 5. Resultados resumidos del test de Shapiro-Wilk para cada zona estudiada con las distribuciones de NDVI de cada periodo de 8 días durante 12 años.

Se obtiene que en las Zonas 1, 2 y 3 el ajuste a la normal es pobre o muy pobre excluyendo únicamente una distribución con bondad de ajuste a la normal media en la Zona 3. En la Zona 4, sin embargo, el número de distribuciones con bondades de ajuste a la normal muy pobre disminuye, aumentando el número de distribuciones con bondad de ajuste a la normal pobre y aparecen 3 distribuciones con ajuste a la normal medio y bueno. Este comportamiento de la Zona 4 se explicaría considerando que al corresponder a un bosque las diferencias de NDVI respecto a la media deberían ser más suaves que en el pasto de una zona semiárida, como son las otras tres zonas de estudio y, por tanto, se produce un mejor ajuste a la normal. En resumen, el test de Shapiro-Wilk en las regiones estudiadas indica que la suposición de ajuste a la normal del NDVI no es una buena aproximación a las distribuciones de datos considerados en este estudio.

Este resultado contrasta con el caso de las Grandes Llanuras de EEUU (Peters, 2002) en el que el 80.3% de la muestra sigue distribuciones normales con una tolerancia de 0.01 (menor que la utilizada en este estudio) o un estudio realizado en el estado de Kentucky (Schwab, 2005) que da probabilidades de ajuste a la normal del orden de 0.75. Sin embargo, en otro estudio realizado en la cuenca del Semliki del río Nilo (Onema, 2009) solo un tercio de las distribuciones de NDVI tenían una normalidad media o superior, esto hace pensar que la normalidad del índice NDVI para algunas regiones geográficas, como la cuenca del Semliki y la región de Murcia, de carácter muy árido, no se cumple.

En otro estudio de la Comunidad de Madrid (Martín, 2014) se observaba que la distribución gaussiana solo explicaba correctamente, según el test χ^2 , 19 de 46

intervalos. Este resultado indica que el criterio del seguro agrario indexado para determinar pérdidas en pasto puede tener graves problemas de aplicación en una región tan árida y por tanto es necesario realizar un estudio más detallado de las posibles distribuciones a usar en el seguro indexado. En las Figuras 11 a 14 se muestran las distribuciones con las dos mejores y las dos peores bondades de ajuste a la normal de cada Zona. Se puede observar que las peores distribuciones o bien tienen la muestra mucho más desplazada hacia valores bajos de lo que se esperaría en una normal, con una larga cola hacia valores altos, o bien tiene unas distribuciones que se aproximan a la normal truncadas por los laterales.

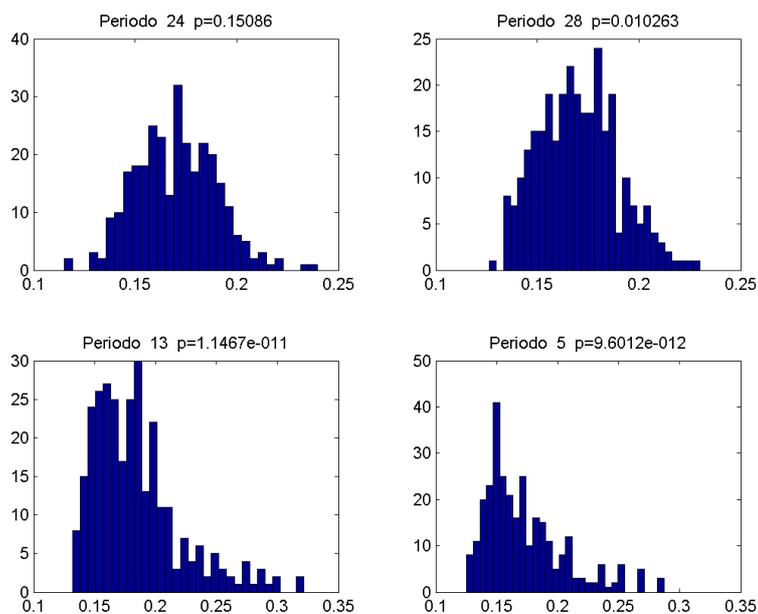


Figura 11. Histogramas de las dos mejores (gráficas superiores) y dos peores (gráficas inferiores), según la bondad de ajuste a la normal, distribuciones de cada periodo de MODIS de la Zona 1.

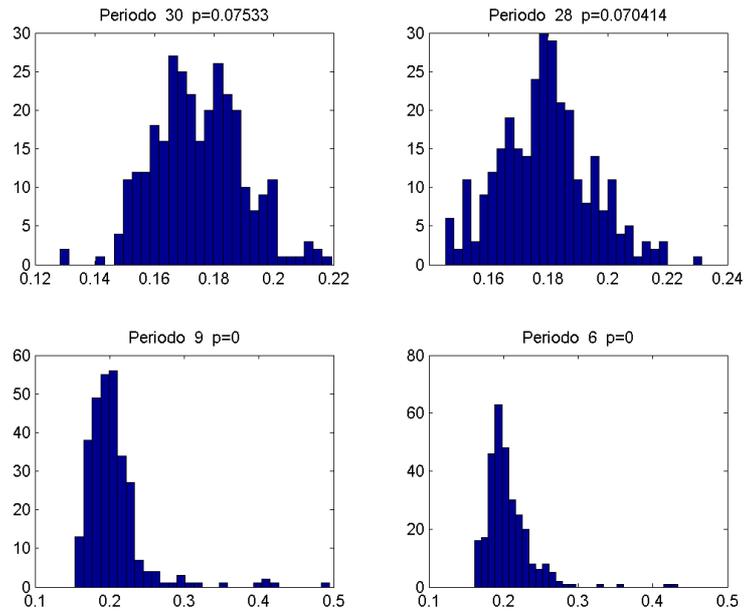


Figura 12. Histogramas de las dos mejores (gráficas superiores) y dos peores (gráficas inferiores), según la bondad de ajuste a la normal, distribuciones de cada periodo de MODIS de la Zona 2.

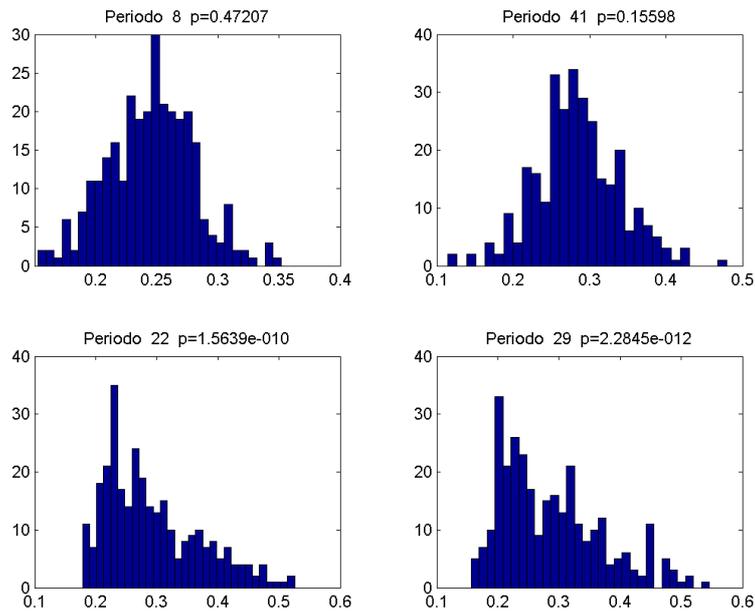


Figura 13. Histogramas de las dos mejores (gráficas superiores) y dos peores (gráficas inferiores), según la bondad de ajuste a la normal, distribuciones de cada periodo de MODIS de la Zona 3.

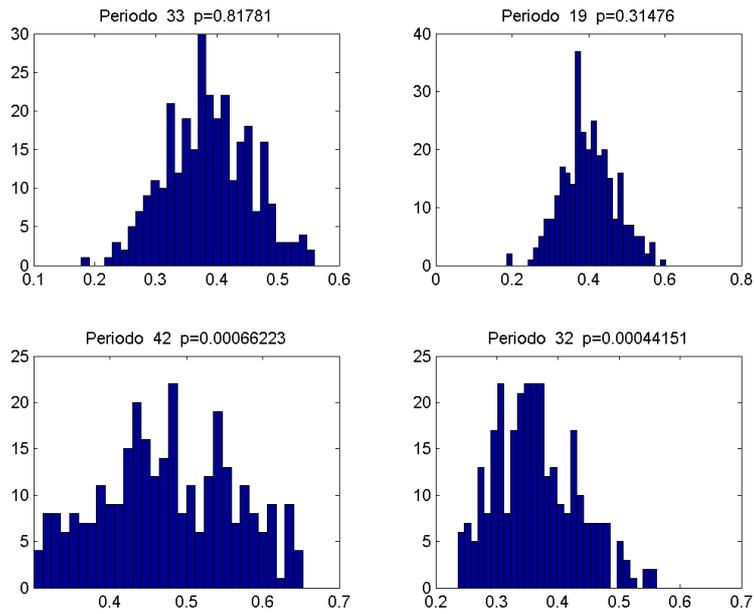


Figura 14. Histogramas de las dos mejores (gráficas superiores) y dos peores (gráficas inferiores), según la bondad de ajuste a la normal, distribuciones de cada periodo de MODIS de la Zona 4.

3.4. Índice SPI

Para estudiar el índice SPI se ha ajustado a una distribución gamma incompleta usando dos métodos distintos. El primer ajuste se ha realizado con el programa *Statgraphics*, que emplea el método de mínimos cuadrados para realizar el ajuste a la distribución. La Tabla 6 muestra los valores de ajuste:

Zona	Probabilidad de 0 p_0	Factor de forma k	Factor de escala θ	Bondad de ajuste
Zona 1	0.016	1.055	0.031	0.0495
Zona 2	0.009	1.117	0.030	0.0048
Zona 3	0.0289	0.925	0.033	0.0635
Zona 4	0.0199	0.832	0.020	0.0305

Tabla 6. Ajuste a la distribución gamma incompleta de las distribuciones mensuales de precipitación acumulada por el método de mínimos cuadrados.

El resultado de la cuarta columna se evalúa de modo que resultados menores de 0.05 significarían diferencias significativas con la distribución por el test de Kolmogorov-Smirnoff al 95% de confianza. Esto resultaría en diferencias significativas en las Zonas 1,

2 y 4 pero no para la Zona 3; aunque la Zona 1 se queda muy cerca del límite.

La Tabla 7 muestra el ajuste según el método de máxima verosimilitud (programado por Saa Requejo, 1991) utilizando el método de (Mielke 1975, 1976) a la distribución gamma incompleta:

Zona	Probabilidad de $0 < p_0$	Factor de forma k	Factor de escala θ	Bondad de ajuste χ^2	Bonda de ajuste K-S
Zona 1	0.016	1.055	32.073	Diferencias sign. 95 %	Diferencias sign. 99 %
Zona 2	0.009	1.117	32.964	Diferencias sign. 95 %	Diferencias sign. 99 %
Zona 3	0.0289	0.925	30.327	Diferencias sign. 95 %	Diferencias sign. 99 %
Zona 4	0.0199	0.849	48.318	Diferencias sign. 95 %	Diferencias sign. 99 %

Tabla 7. Ajuste a la distribución gamma incompleta de las distribuciones mensuales de precipitación acumulada por el método de máxima verosimilitud.

La bondad de ajuste de la distribución gamma incompleta muestra diferencias significativas en el 95% de confianza según el test χ^2 y diferencias significativas en el 99% de confianza según el test de Kolmogorov-Smirnoff. Notese que los resultados de las Tablas 4 y 5 son equivalentes en probabilidad de cero y factor de forma, pero en el factor de escala varía en 3 órdenes de magnitud. Es importante destacar que el método de mínimos cuadrados es un método de aproximación que no utiliza hipótesis probabilísticas sobre los datos sino solo sobre su modelo de generación, esto implica que, según los datos obtenidos, el SPI es inaplicable en esta región.

3.5. Análisis PI5mm, NDVI y NDWI

Para tratar de compensar las deficiencias del método del MAGRAMA y del SPI, se propone un método estadístico distinto a partir de los índice PI5mm y PI10mm, estos métodos muestran de manera indirecta la falta de agua del suelo. La Tabla 8 muestra el ajuste de las frecuencias de PI5mm de cada región a una distribución exponencial decreciente. Donde x representa el índice PI5mm, y la frecuencia de datos en los que ha aparecido ese valor de PI5mm, y A y b los dos parámetros a ajustar. En la Figura 15 se muestran los pares x e y así como el ajuste realizado. No se han detallado las estadísticas de SP10 ya que todos los análisis verifican que las dos variables son equivalentes.

Para comparar el valor dado por el PI5mm con la actividad fotosintética del pasto según el Seguro Agrario indexado se han calculado los parámetros de sequia tal y como se explica en el apartado 2.3. y se han comparado con los momentos en los que Agroseguro (<http://www.agroseguro.es/indices/Pastosx>) ha calificado como indemnizable en pastos según lo acordado en dichos años.

Zona	A	b	R ²
Zona 1	284.5840±7.4339	0.4241±0.0125	0.9960
Zona 2	319.6382±8.7999	0.4718±0.0143	0.9958
Zona 3	202.1102±2.6610	0.3136±0.0050	0.9985
Zona 4	247.9547±9.7680	0.3884±0.0176	0.9894

Tabla 8. Resultados del ajuste de la distribución de frecuencias de PI5mm de cada zona a una exponencial decreciente $y = A \cdot e^{-b \cdot x}$.

Ya que el índice PI5mm es un índice pluviométrico mientras que el criterio del seguro sigue un índice de vegetación se ha retardado la predicción de sequía de 0 a 5 periodos para poder compararse. Se han realizado las gráficas de 6 a 14 periodos pero ni aportan información nueva ni tiene sentido físico suponer un retardo en la captación de agua mucho mayor de un mes así que se ha decidido prescindir de ellos. En las Figuras 16 a 21 se muestra la comparación entre los daños a pastos por los dos sistemas.

Se observa que generalmente las dos predicciones coinciden con un mayor o menor retardo. La predicción del PI5mm es más discreta y varía con mas frecuencia que la del Seguro Agrario encontrándose muchas veces que la línea continua de falta de pastos del seguro agrario corresponde a varios picos seguidos del PI5mm. También se observan distintos picos de PI5mm que no corresponden a periodos de sequia del seguro agrario sobre todo en el verano y para retardos bajos. Esto podría deberse a que es la época en la que más sesgada del índice de vegetación respecto a la normal y, por tanto, más difícil es detectar la falta de actividad fotosintética con este supuesto. El PI5mm, de esta manera podría detectar sequias puntuales que se escapan al método del seguro agrario, siendo este necesario para daños a largo plazo, de modo que se puede conseguir un índice combinado a partir de ambos sistemas.

En la figura 22 se muestra la serie temporal de NDVI comparada con los resultados de sequia del Seguro agrario indexado y del PI5mm. Se observa que los momentos de disminución de actividad fotosintética coinciden con caídas del índice.

En la Figura 23 se muestra la serie temporal de NDWI comparada con los resultados del Seguro agrario indexado y del PI5mm. Se puede ver que eventualmente el índice NDWI muestra un acusado pico hacia valores más negativos que en ocasiones coincide con un pico que detecta sequía del PI5mm. Hay que recordar que, como se indicó en la sección 3.4, la sequía detectada por el índice PI5mm tiene un carácter retardado, sin embargo, ese retardo no es siempre el mismo por tanto sería necesario un estudio adicional para establecer en qué medida el índice NDWI puede definir sucesos de sequía y a que rangos equivale cada caída anómala del índice.

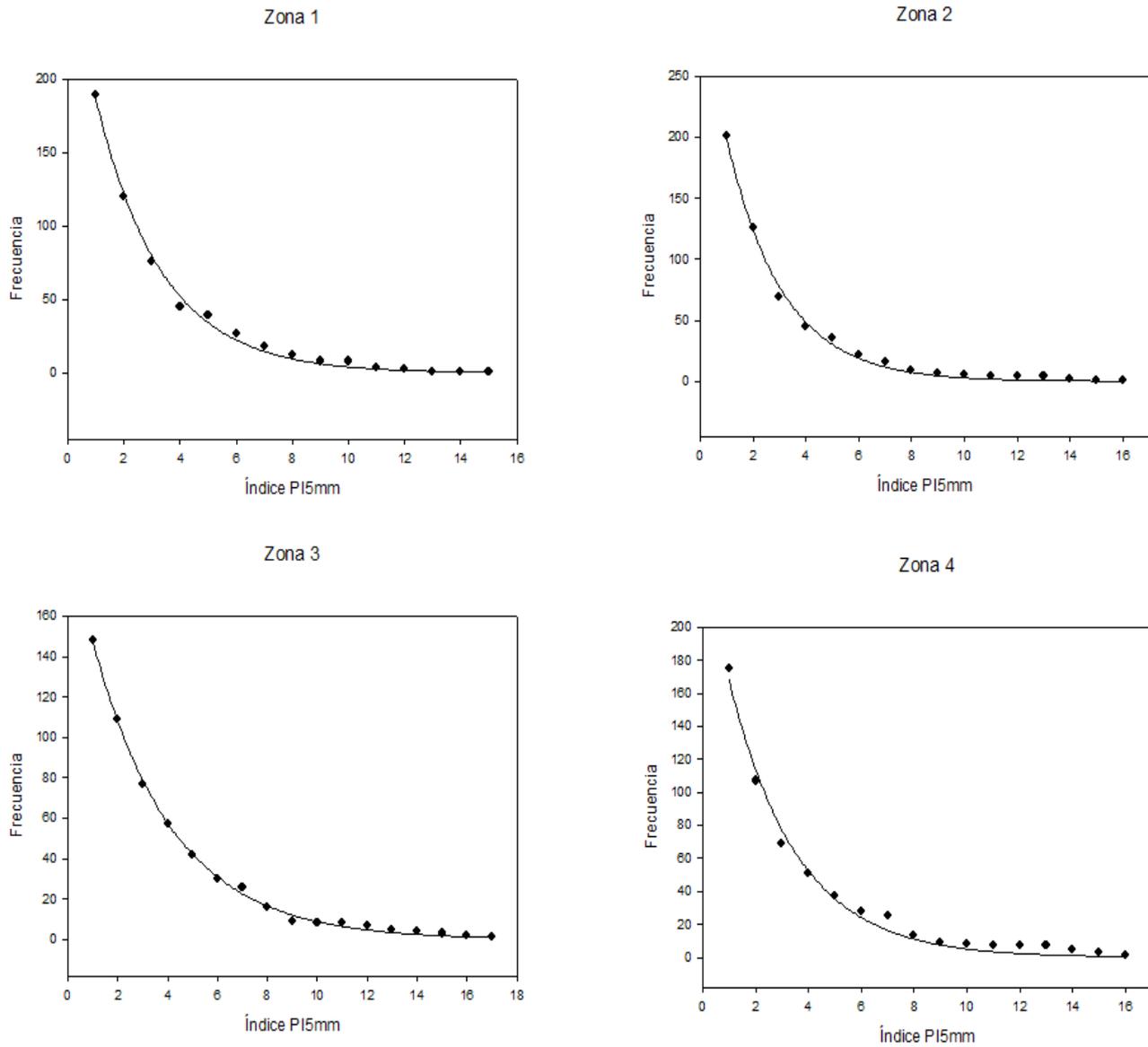


Figura 15. Ajustes de la distribución de frecuencias de PI5mm a una distribución exponencial decreciente.

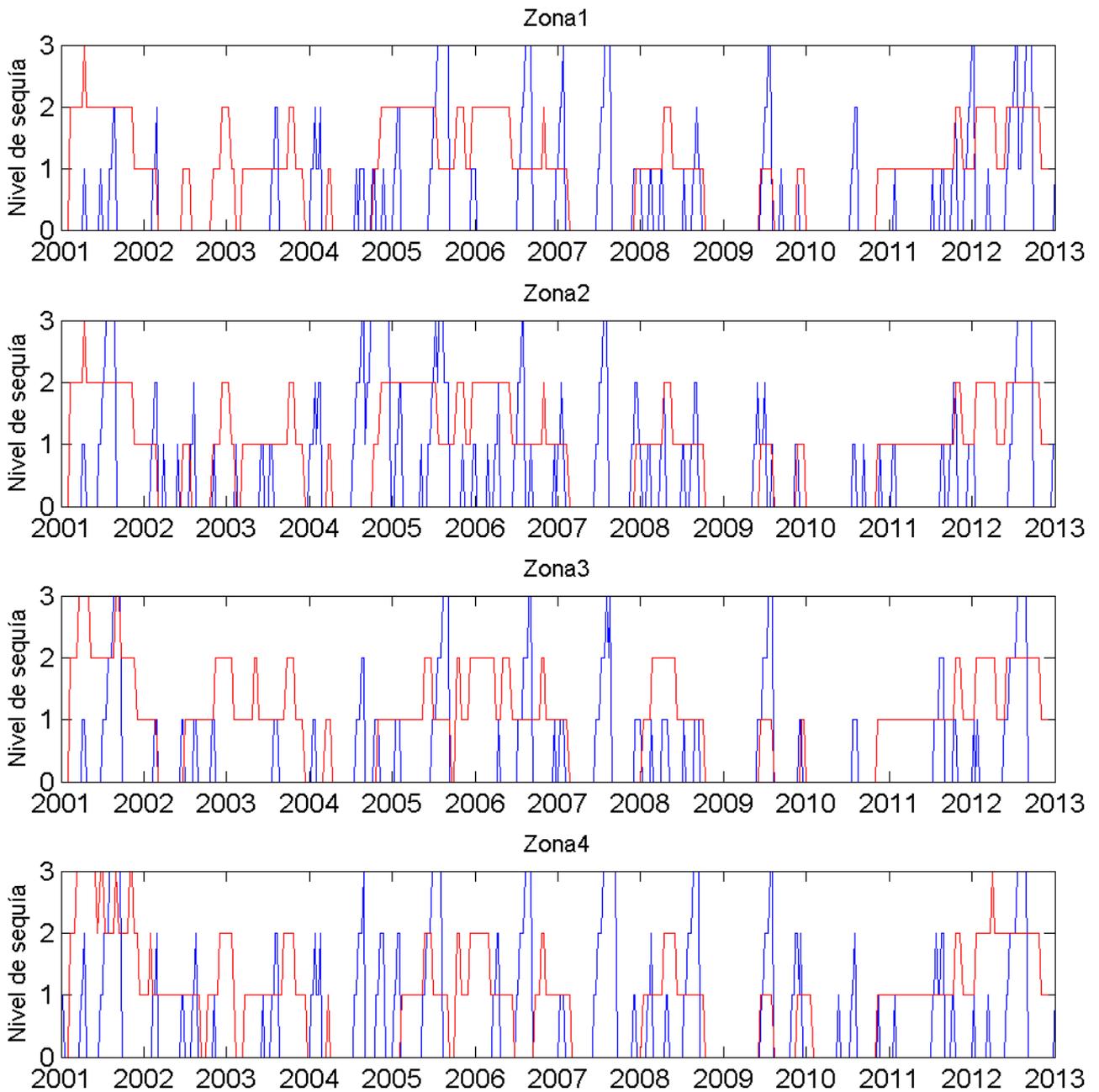


Figura 16. Comparativa de la predicción de sequía según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) sin retardo.

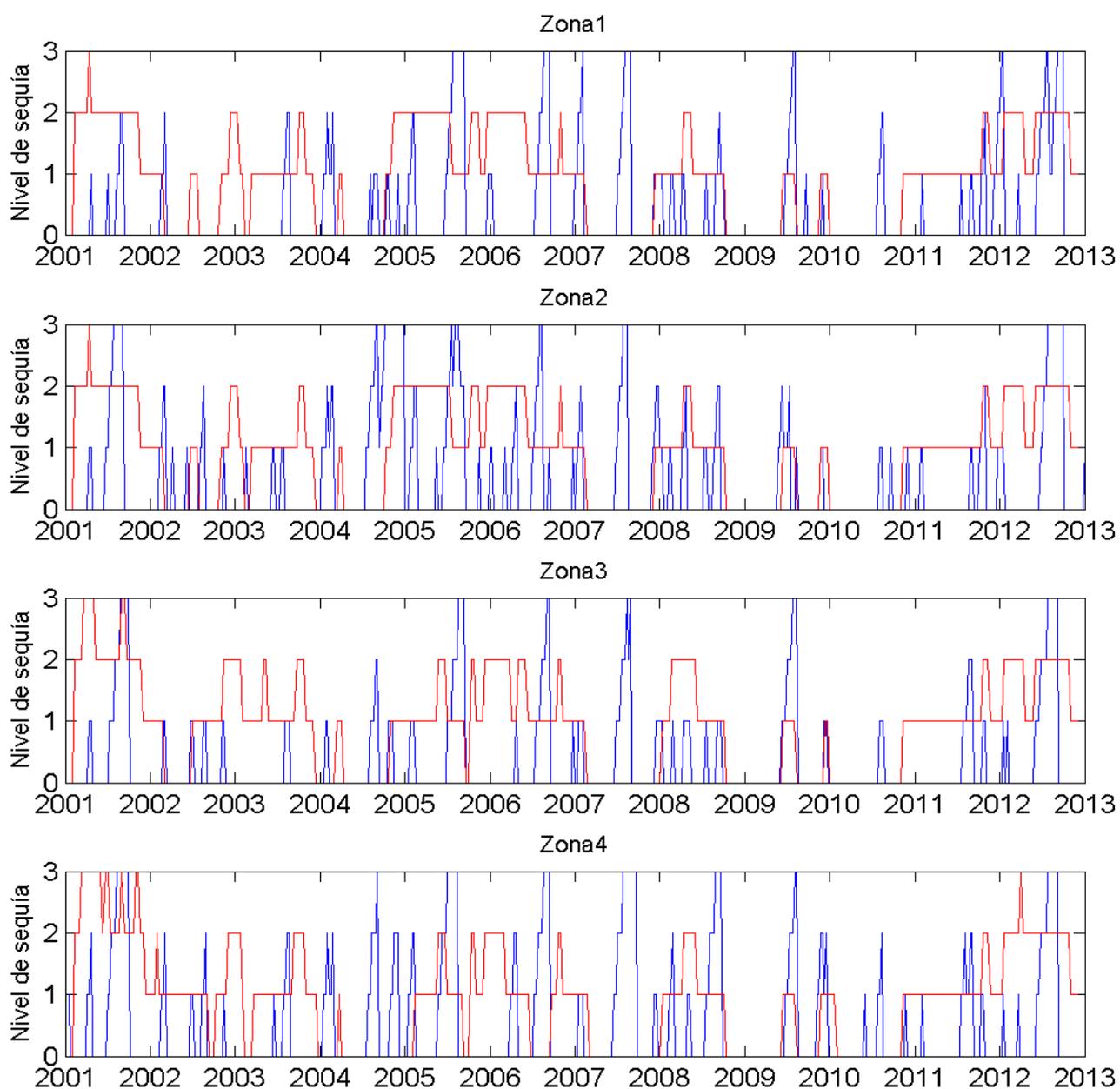


Figura 17. Comparativa de la predicción de sequia según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) con retardo de 1 periodo.

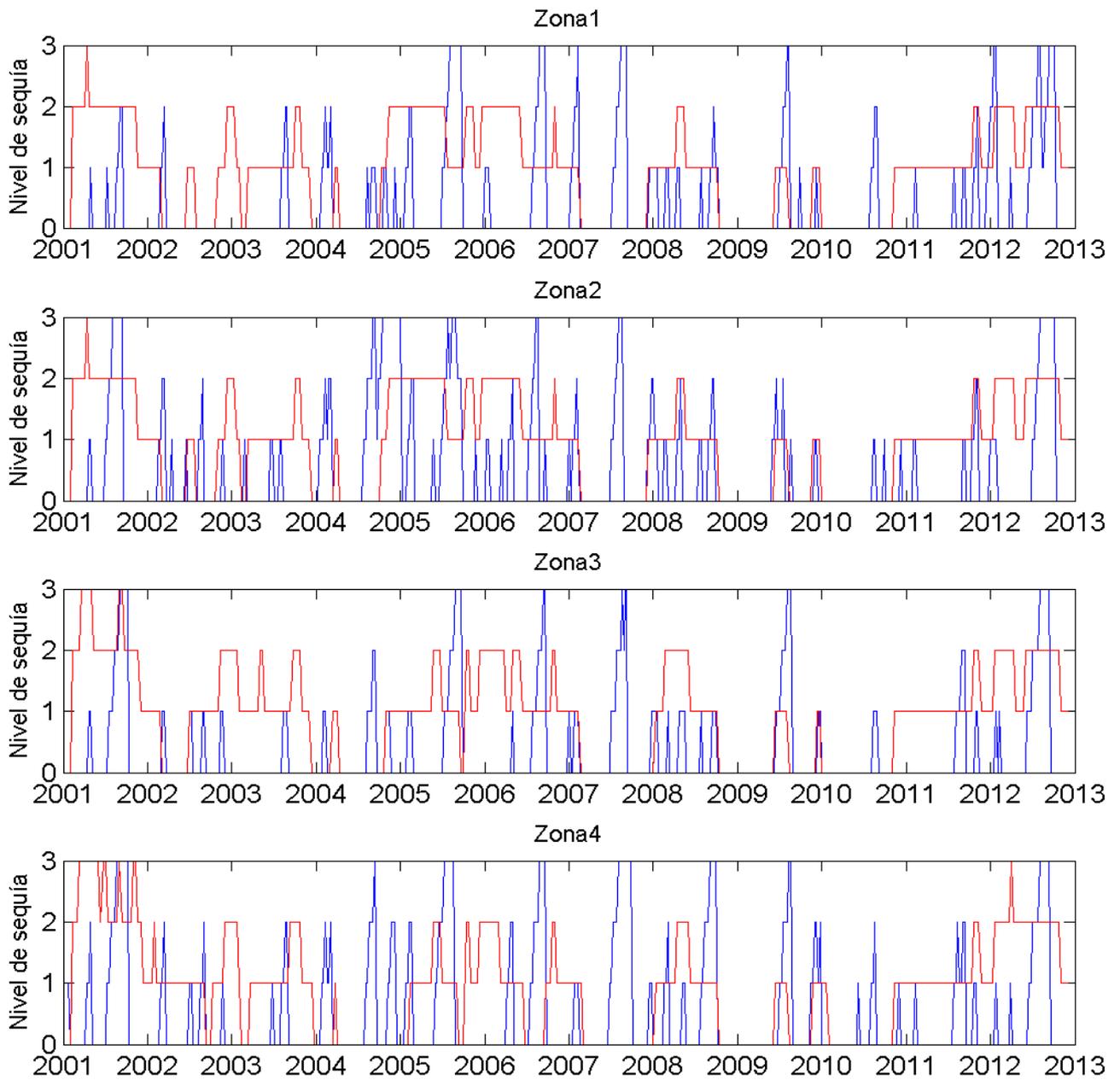


Figura 18. Comparativa de la predicción de sequía según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) con retardo de 2 periodos.

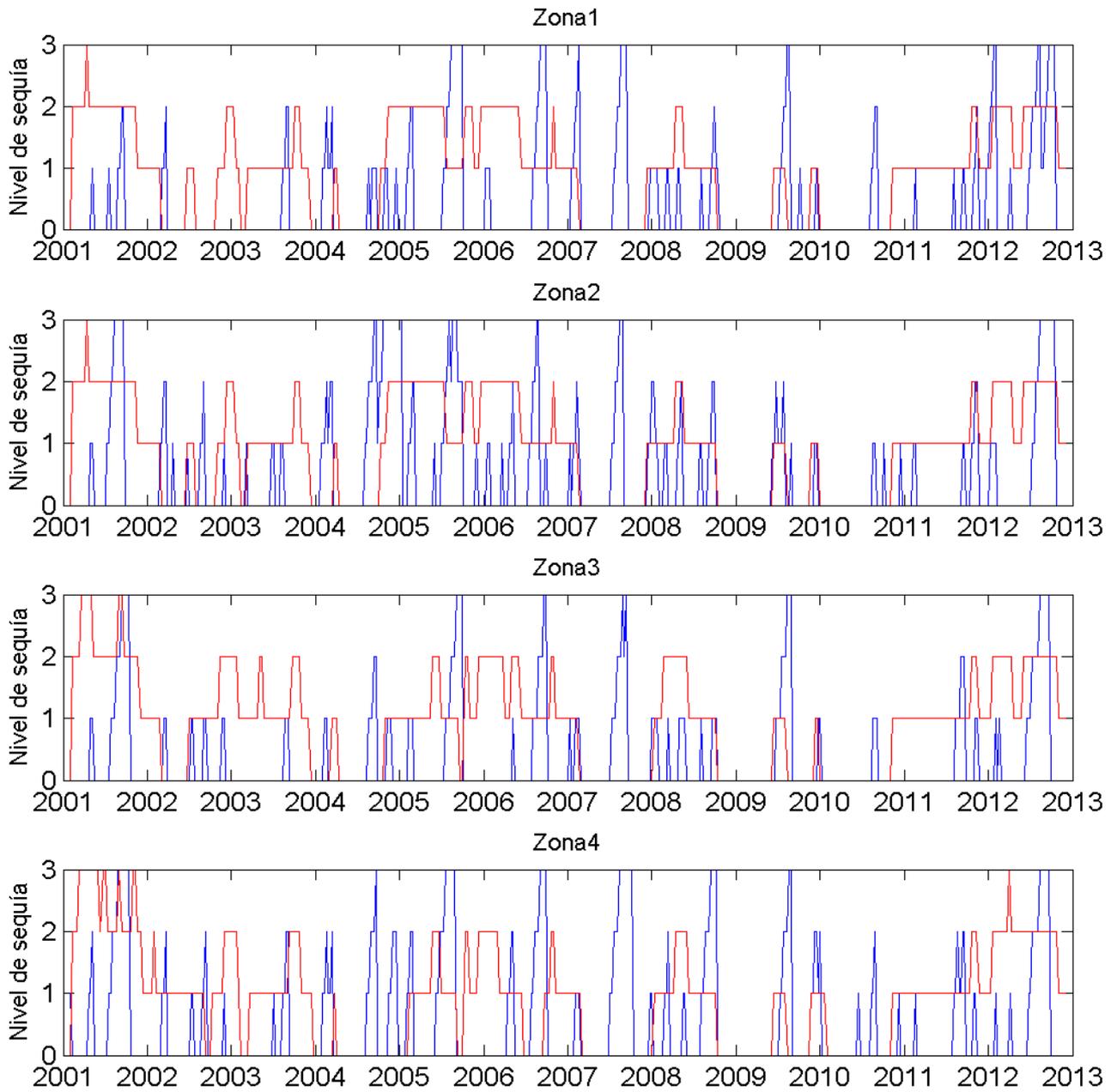


Figura 19. Comparativa de la predicción de sequia según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) con retardo de 3 periodos.

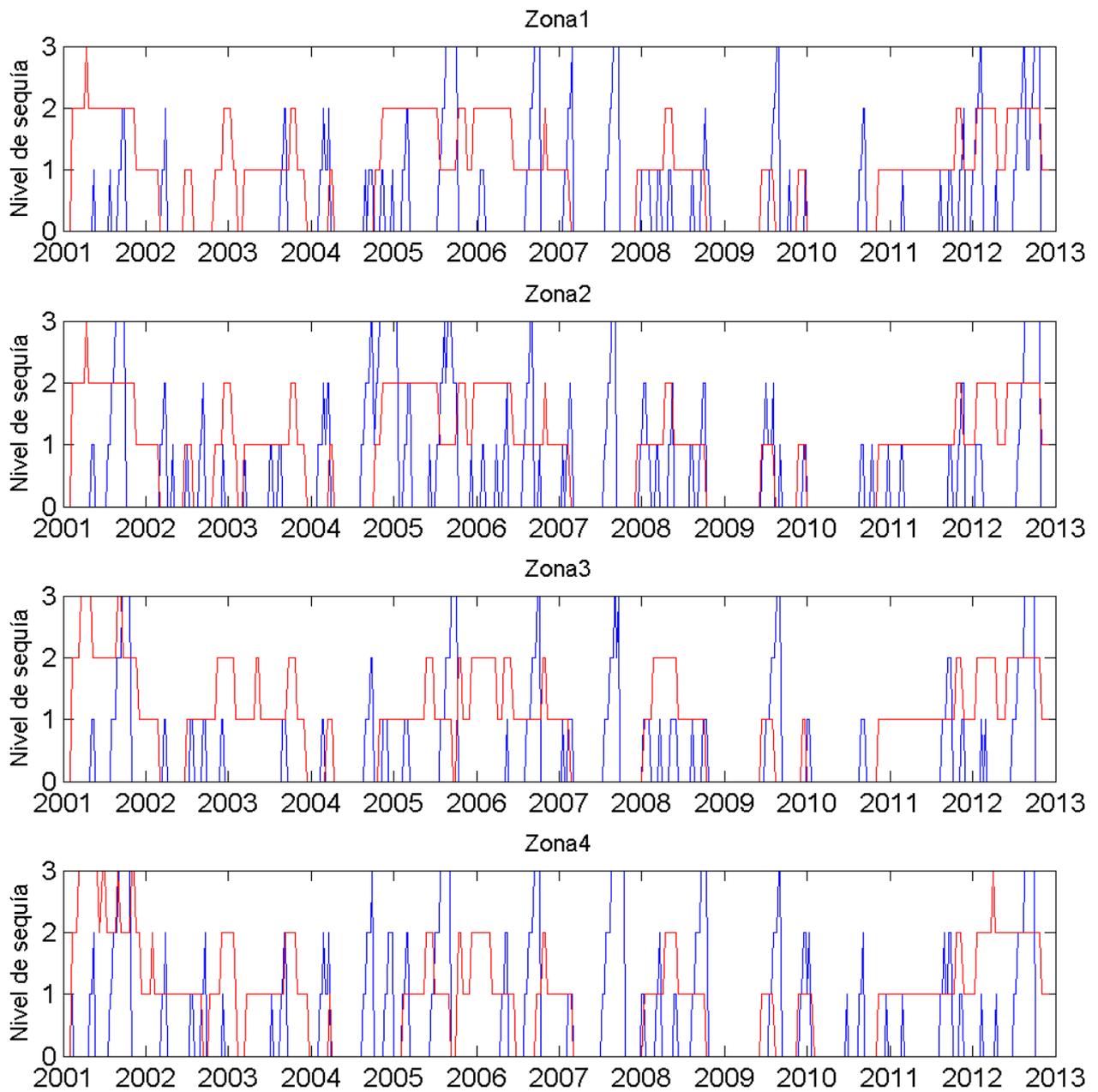


Figura 20. Comparativa de la predicción de sequia según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) con retardo de 4 periodos.

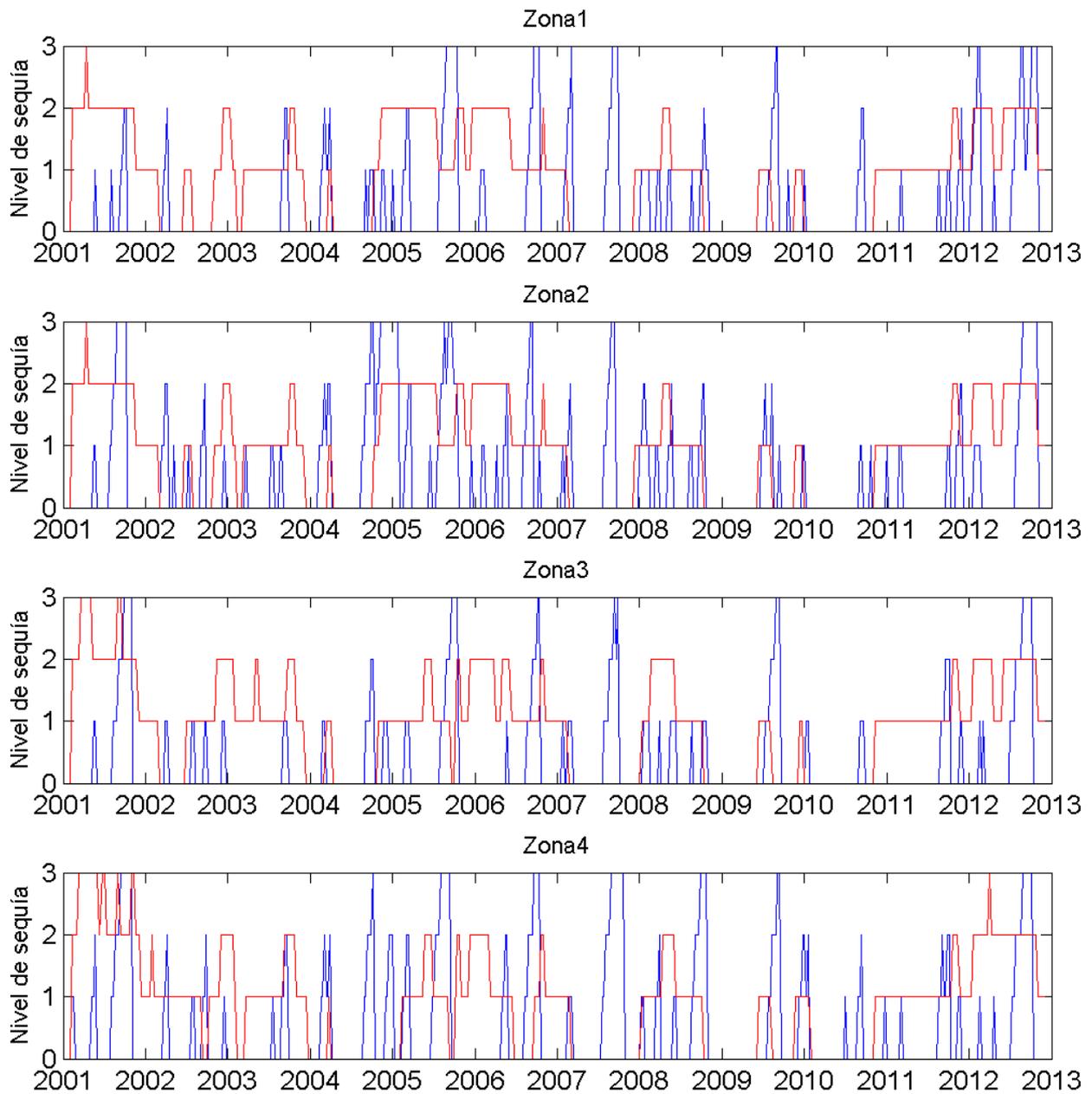


Figura 21. Comparativa de la predicción de sequia según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) con retardo de 5 periodos.

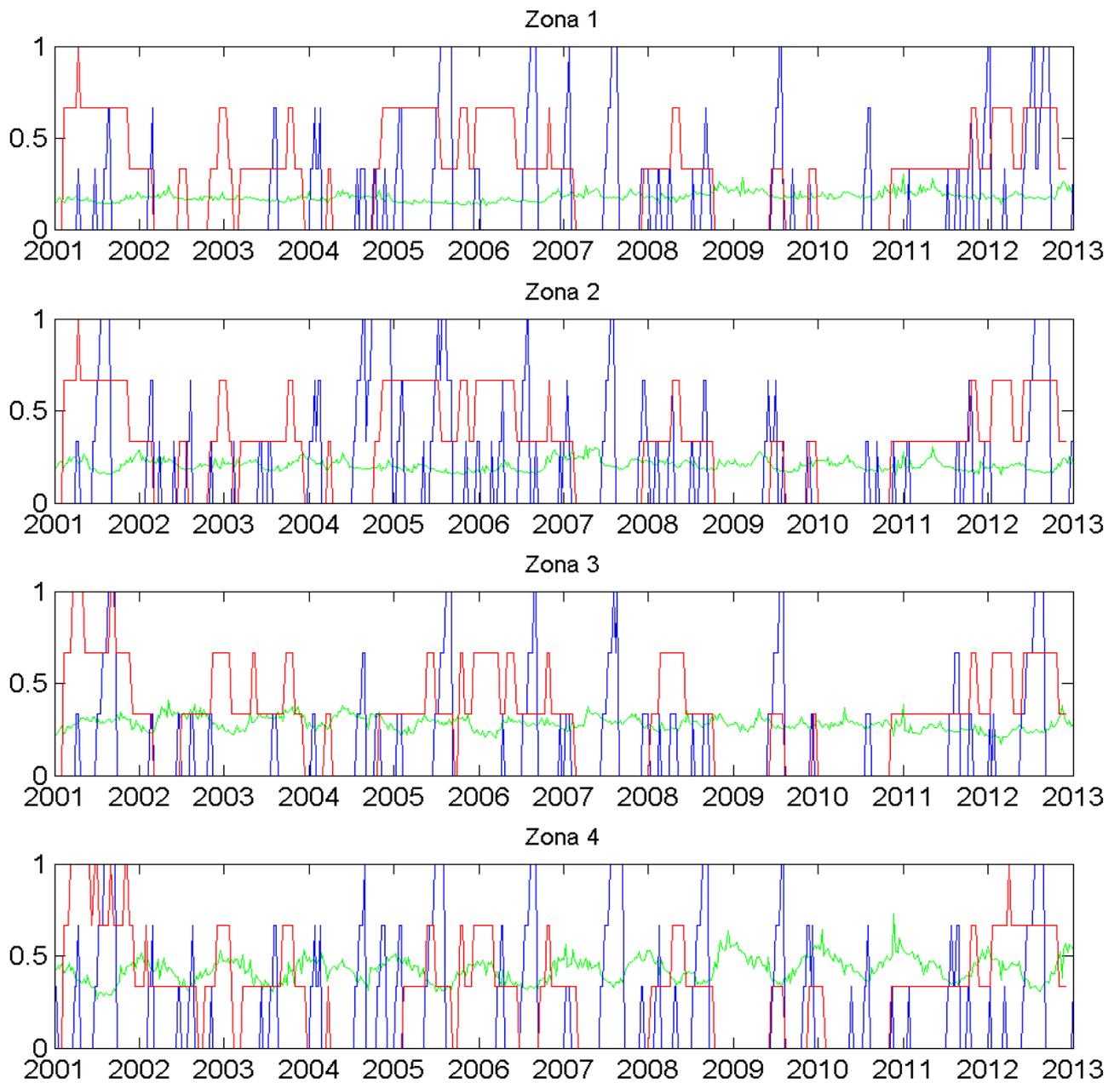


Figura 22. Comparativa de los estados de sequia según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) sin retardo con la serie temporal de NDVI (verde). Los niveles de sequía se encuentran divididos entre 3 para una mejor comparación.

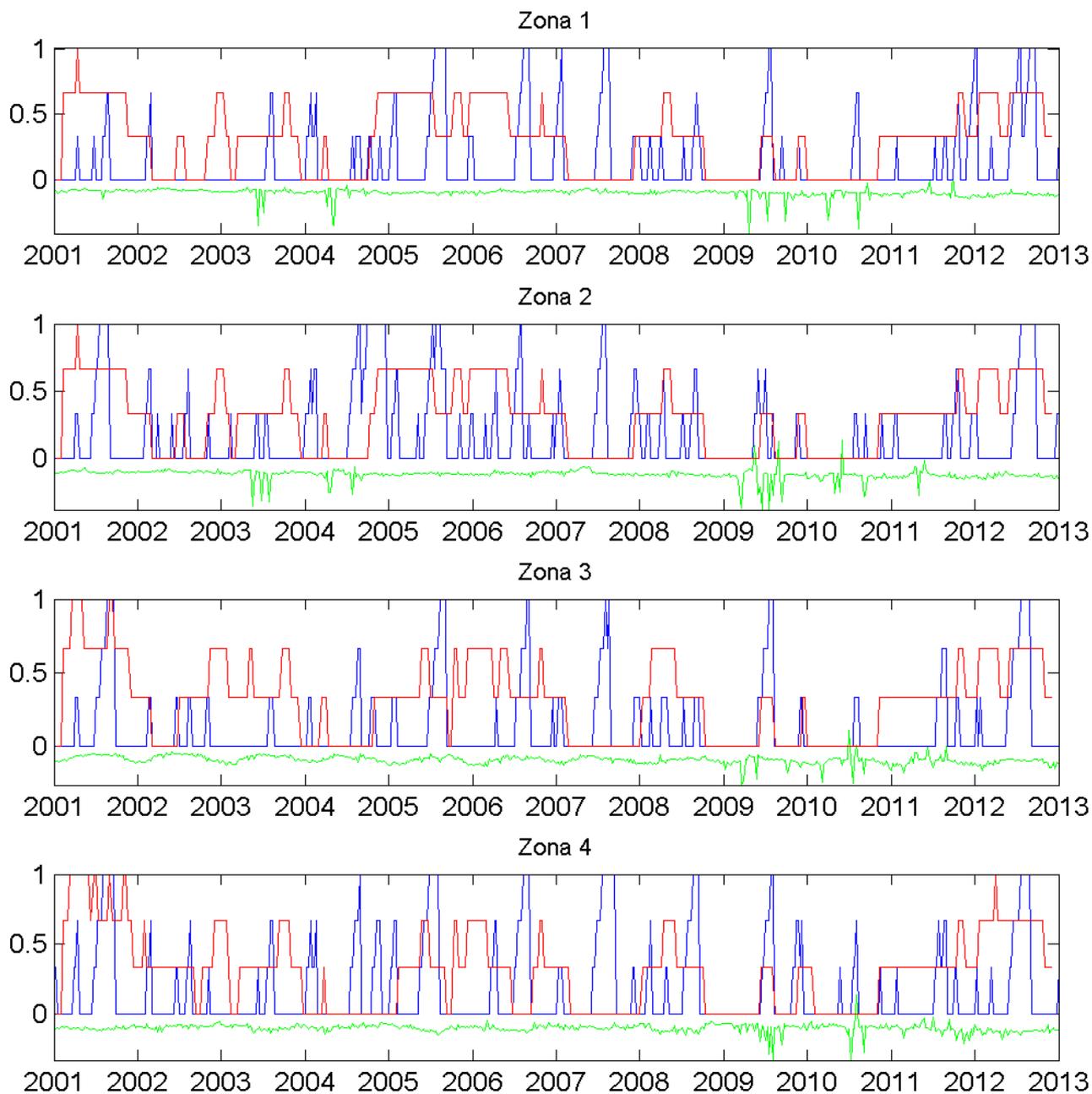


Figura 23. Comparativa de los estados de sequía según el criterio del Seguro Agrario indexado (rojo) y el índice PI5mm (azul) sin retardo con la serie temporal de NDWI (verde). Los niveles de sequía se encuentran divididos entre 3 para una mejor comparación.

3.6. Correlación entre índices

Para estudiar la relación entre índices se han tenido en cuenta las siguientes variables:

- Evapotranspiración.
- Precipitación acumulada de 1, 2 y 4 periodos.
- Temperatura media.
- PI5mm y PI10mm
- cociente entre precipitación y evapotranspiración (medida de la aridez del clima)
- NDVI: media olímpica, máximo y mínimo.
- NDWI: media olímpica, máximo y mínimo.
- NDDI: media olímpica, máximo y mínimo.
- NDWU: media olímpica, máximo y mínimo.

Se ha realizado un análisis factorial exploratorio (EFA) preliminar a cuatro factores en el que se ha comprobado que los valores máximos y mínimos de los índices NDVI, NDWI, NDDI y NDWU tienen un comportamiento no adecuado con el resto de variables, estando correlacionados eventualmente con factores en los que no se encuentra su media olímpica. Este resultado permite resaltar la inconveniencia de estudios con un único píxel para determinar la relación entre las distintas variables. Los resultados detallados del análisis factorial preliminar se encuentran en el Apéndice 2. Resultados del análisis factorial con máximos y mínimos.

Se realizó un segundo análisis factorial exploratorio a cuatro factores eliminando máximos y mínimos de los índices antes mencionados como variables y manteniendo la media olímpica. En la Tablas 9 y 10 se muestran los resultados del análisis factorial.

	Zona 1				Zona 2			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
ETo	0.16	-0.12	-0.09	0.96	-0.16	0.11	0.92	0.07
Prec 1 periodo	-0.30	0.93	0.06	-0.06	0.94	-0.24	-0.03	-0.02
Tmed	0.15	-0.07	-0.10	0.81	-0.08	0.15	0.93	0.14
Prec 2 periodo	-0.49	0.62	0.07	-0.08	0.66	-0.40	-0.06	-0.08
PI5mm	0.83	-0.19	-0.03	0.21	-0.20	0.88	0.16	0.09
PI10mm	0.92	-0.19	0.00	0.18	-0.20	0.95	0.11	0.06
P/Eto	-0.23	0.80	0.07	-0.25	0.85	-0.14	-0.20	-0.01
Prec 4 periodo	-0.59	0.37	0.16	-0.07	0.38	-0.49	-0.08	-0.22
NDVImed	-0.21	0.04	0.97	-0.08	0.05	-0.16	-0.24	-0.96
NDWImed	-0.08	0.01	-0.13	0.04	0.03	-0.02	0.00	-0.13
NDDImed	-0.01	0.16	-0.02	0.01	0.16	0.01	-0.06	0.20
NDWUmed	0.11	-0.03	-0.85	0.04	-0.02	0.05	0.13	0.89

Tabla 9. Análisis factorial de las Zonas 1 y 2.

	Zona 3				Zona 4			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
ETo	-0.21	0.12	0.28	0.86	-0.21	0.92	0.29	0.12
Prec 1 periodo	0.94	0.01	-0.22	-0.05	0.96	-0.03	0.04	-0.17
Tmed	-0.12	0.20	0.31	0.85	-0.12	0.81	0.36	0.17
Prec 2 periodo	0.68	0.08	-0.39	-0.10	0.68	-0.09	0.00	-0.35
PI5mm	-0.23	-0.06	0.86	0.24	-0.24	0.31	0.13	0.82
PI10mm	-0.24	-0.09	0.92	0.16	-0.26	0.26	0.14	0.90
P/Eto	0.88	-0.06	-0.14	-0.17	0.84	-0.16	0.02	-0.07
Prec 4 periodo	0.38	0.17	-0.54	-0.20	0.44	-0.13	-0.14	-0.48
NDVImed	0.08	0.97	-0.11	0.17	0.01	-0.39	-0.90	-0.17
NDWImed	-0.03	0.29	0.03	0.44	0.05	-0.26	-0.03	-0.12
NDDImed	0.04	-0.55	0.13	-0.26	0.04	0.31	0.23	0.19
NDWUmed	-0.03	-0.95	0.01	-0.09	0.04	0.25	0.94	0.10

Tabla 10. Análisis factorial de las Zonas 3 y 4.

Aunque los factores siguen un orden arbitrario, debido al propio algoritmo, se pueden establecer cuatro grupos de variables claros según cada factor:

- Grupo 1: Precipitación acumulada de 1 periodo y P/Eto. Secundarias: Precipitación acumulada de 2 y 4 periodos.
- Grupo 2: Temperatura media y evapotranspiración.
- Grupo 3: PI5mm y PI10mm. Secundarias: precipitación acumulada de 2 o 4 periodos (según la Zona).
- Grupo 4: medias olímpicas de NDVI y NDWU.

Se han estudiado las relaciones entre las variables más representativas de cada grupo, es decir, la precipitación acumulada de 1 periodo, la evapotranspiración, el PI5mm y la media olímpica de NDVI. En la Figura 24 se muestra la relación entre precipitación y evapotranspiración y en la Figura 25 entre precipitación y NDVI. Se observa que en ambos casos existe una dispersión de la precipitación en valores altos de la misma.

En la Figura 26 se muestra la relación entre precipitación y PI5mm. Se puede observar que la distribución sigue una clara función bimodal, por una parte se observa que hacia precipitaciones acumuladas menores de 5 se encuentran todos los valores con PI5mm mayores de 1, lo que es la propia definición del índice, encontrándose que cuanto menor es el PI5mm mayor intervalo de precipitación acumulada, encontrándose todos los valores de PI5mm exclusivamente en precipitación acumulada nula. Para PI5mm=1 se encuentran todos los demás valores de precipitación.

En la Figura 27 se muestra la relación entre PI5mm y evapotranspiración y en la Figura 28 entre PI5mm y NDVI. En ambas gráficas se observa que para valores más bajos de PI5mm hay un continuo de valores de la otra variable mientras que para valores altos de PI5mm se forman colas. En el primer caso se observa una cola hacia valores altos de evapotranspiración y otra hacia valores bajos menos acusada, salvo en la Zona 2. En el segundo caso se van reduciendo hacia valores más bajos los posibles valores de NDVI, esto coincide con el hecho de que dichos valores tienen el sentido de mayor sequedad.

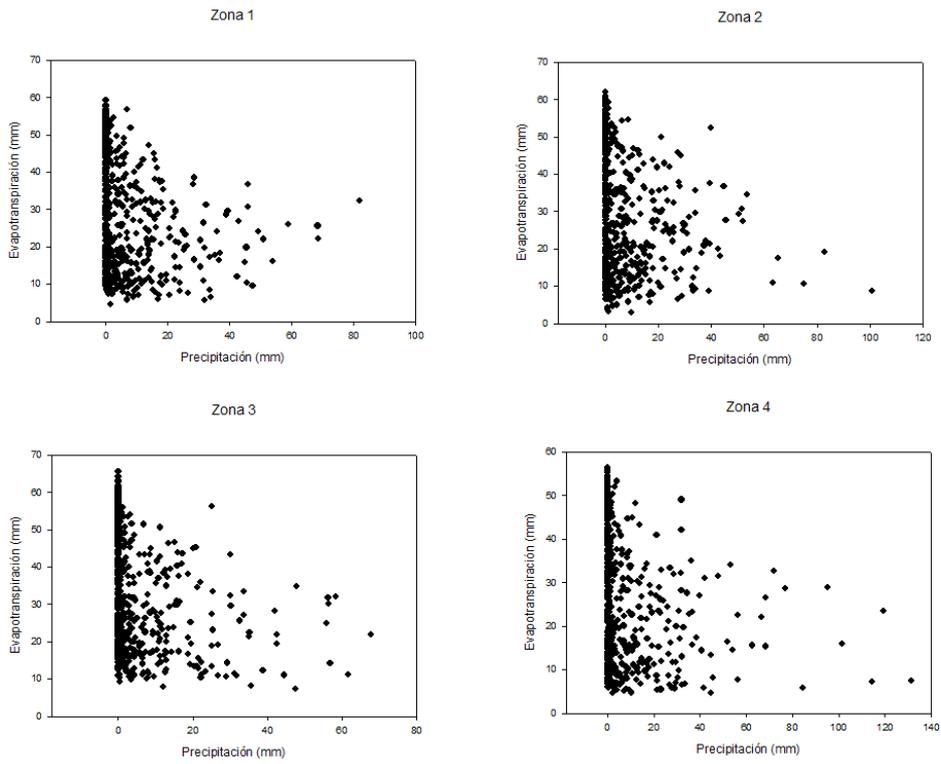


Figura 24. Relación entre precipitación y evapotranspiración en las 4 zonas de estudio.

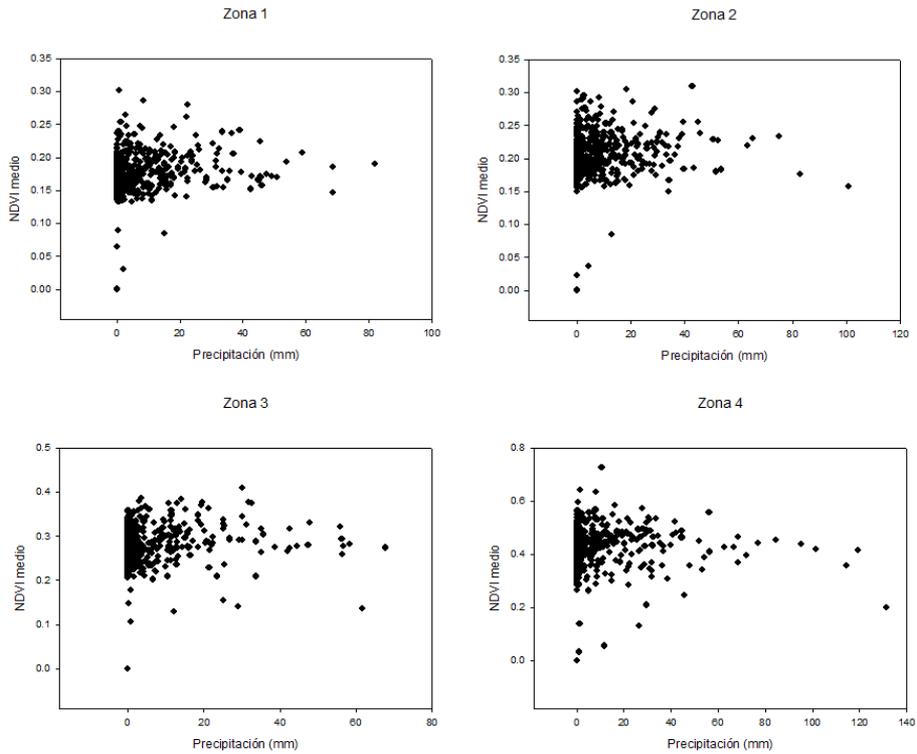


Figura 25. Relación entre precipitación y NDVI en las 4 zonas de estudio.

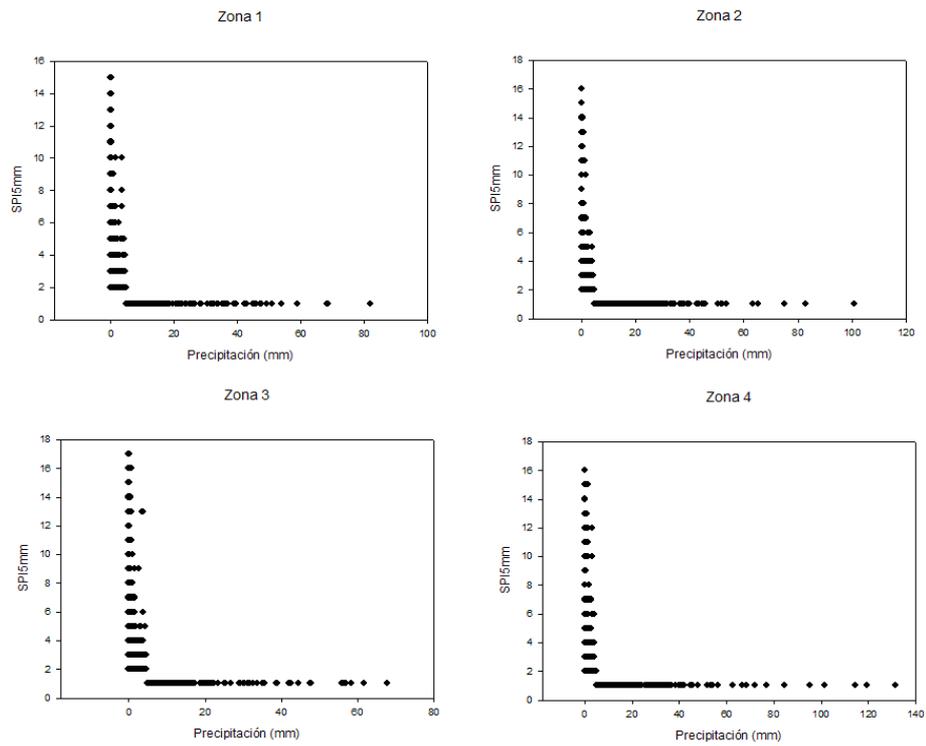


Figura 26. Relación entre precipitación y PI5mm en las 4 zonas de estudio.

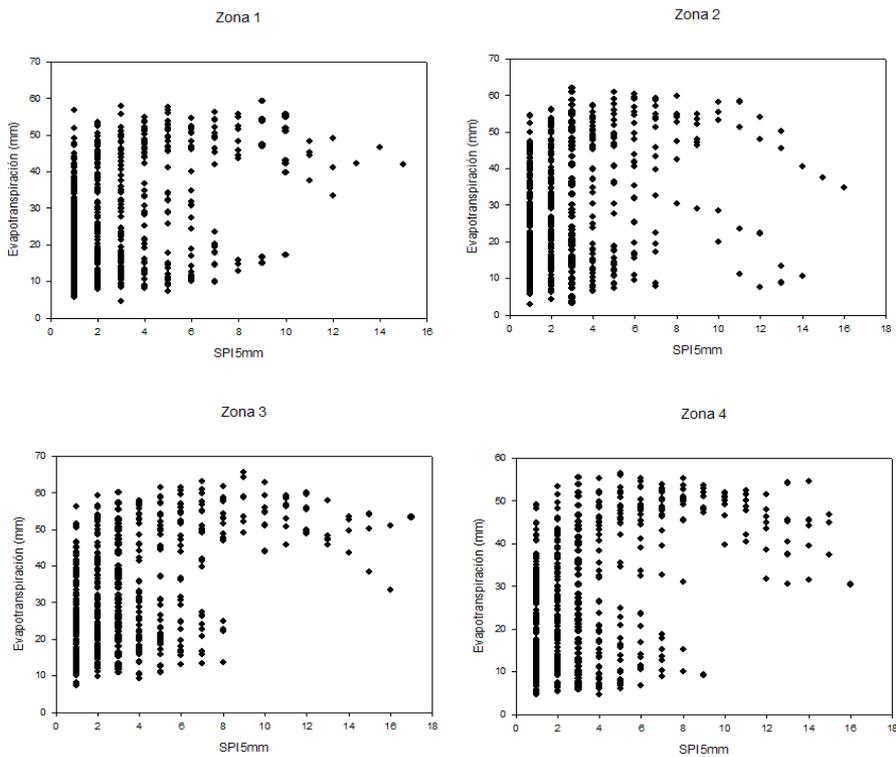


Figura 27. Relación entre PI5mm y evapotranspiración en las 4 zonas de estudio.

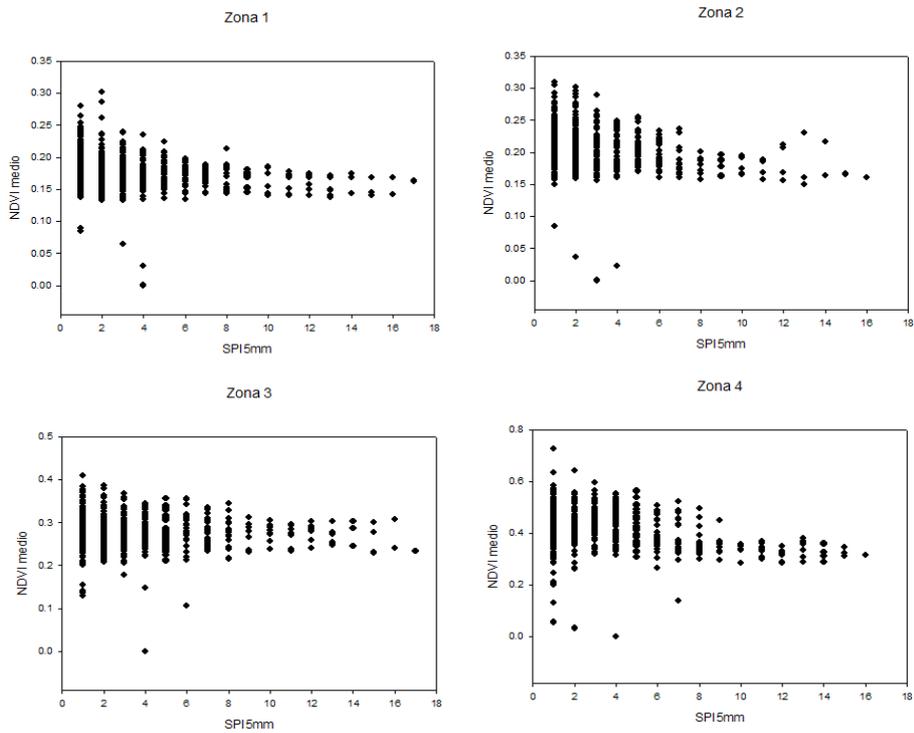


Figura 28. Relación entre PI5mm y NDVI en las 4 zonas de estudio.

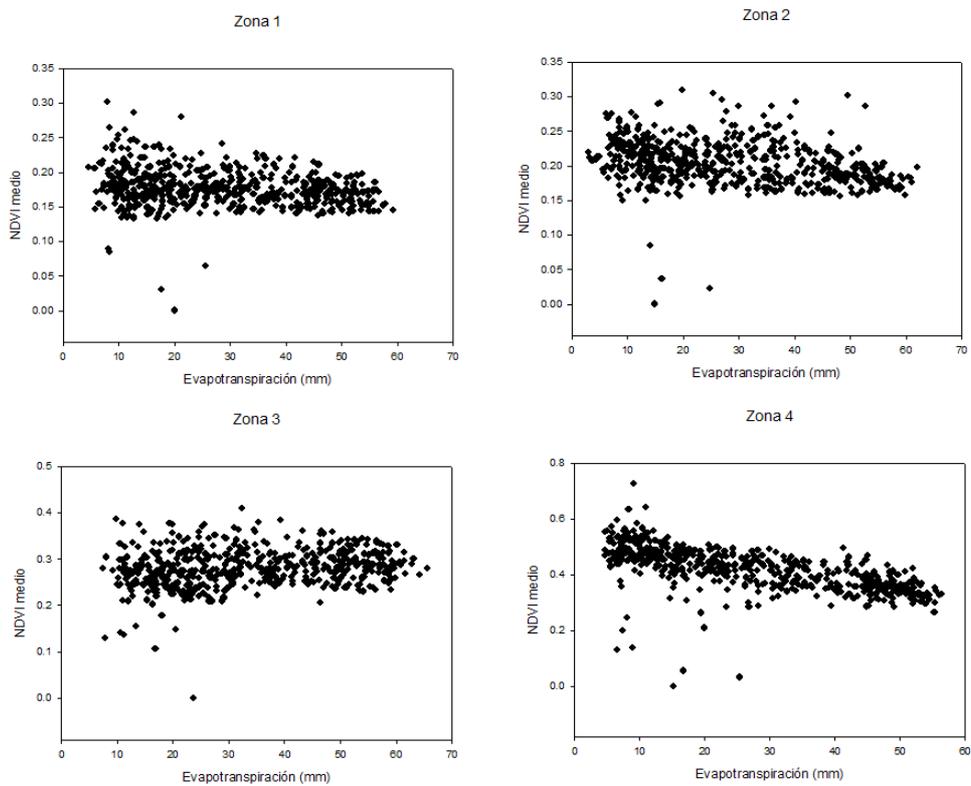


Figura 29. Relación entre la evapotranspiración y el índice NDVI en las 4 zonas de estudio.

En la Figura 29 se muestra la relación entre el evapotranspiración y el NDVI. Se ha realizado un ajuste lineal de las variables, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 11. El reducido coeficiente de ajuste R^2 muestra que la dispersión de la medida es exagerada para poderse considerar alguna correlación. Cabe destacar que la Zona 4 tiene un coeficiente de ajuste mucho mayor que las otras regiones, lo que se podría explicar porque al ser un bosque tenga una autoregulación mayor de sus recursos hídricos. En conclusión, las relaciones entre las distintas variables están agrupadas en factores y la relación entre variables pertenecientes a factores distintos es prácticamente inexistente.

Región	Pendiente	Ordenada origen	Coeficiente R^2
Zona 1	-0.0004	0.1863	0.0371
Zona 2	-0.0006	0.2213	0.0855
Zona 3	0.0006	0.2605	0.0470
Zona 4	-0.0031	0.5022	0.3847

Tabla 11. Regresión lineal de evapotranspiración y NDVI.

Para trabajos futuros sería necesario una comprobación de los métodos utilizados en este trabajo en una región que no fuera árida.

4. CONCLUSIONES

Pasamos a enumerar las conclusiones alcanzadas en función de los objetivos del estudio .

1) Se han estudiado tres índices de vegetación, además del NDVI. Se ha encontrado que el índice NDWI puede servir para detectar anomalías del NDVI, ya que tiene comportamiento semejante al NDVI pero menos errático. El índice NDDI no es aplicable en la región porque no está planteado para los rangos de valores de una región tan árida. El índice NDWI tiene un comportamiento independiente al del NDVI ya que tiene un significado físico distinto.

2) Se ha encontrado que el filtrado óptimo de índices satelitales es una combinación de un filtrado basado en la saturación del color y valores de sustitución basados en medias móviles.

Se ha comprobado que el ajuste a la normal del índice NDVI no es asumible en esta región ya que el test de Shapiro-Wilk da una bondad de ajuste pobre o muy pobre en casi todas las regiones y épocas del año.

3) Se ha comprobado que el índice SPI es inaplicable en la región ya que la distribución de precipitación acumulada no sigue una distribución gamma incompleta.

Se han propuesto los índices PI5mm y PI10mm basados en el número de periodos necesarios para acumular un nivel de precipitación fijada (5 y 10 mm).

4) Se ha comparado con el seguro agrario indexado, los índices PIxmm encontrándose que estos señalan sequías más cortas en el tiempo y que varias sequías cortas del PI5mm equivalen a una caída en la actividad fotosintética del seguro agrario indexado. El índice PI5mm está adelantado respecto al índice del seguro agrario, pero este adelanto no es homogéneo.

El índice NDWI tiene caídas anómalas que en ocasiones coinciden con periodos de sequía aunque no se ha establecido el grado de la misma y no sucede siempre.

5) Se ha estudiado la relación entre las distintas variables utilizadas para encontrar estados de sequía y otras variables climáticas habituales, comprobándose que todas ellas se agrupan en varios factores cuyas variables más representativas son la precipitación acumulada de 1 periodo, la evapotranspiración, el PI5mm y la media olímpica de NDVI. Se ha comprobado que dichas variables no tienen prácticamente correlación entre sí, por lo que aportan información complementaria para un seguro coordinado de daños en pasto.

5. BIBLIOGRAFÍA

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO.

DeCoster, J. (1998). Overview of factor analysis. Retrieved 27/6/2015 <http://www.stat-help.com/factor.pdf>

Díaz-Ambrona, C.G.H. 1998a. *La dehesa, un sistema agro-silvo-pastoral para el tercer milenio*. Agricultura 67 (suplemento 16, 789), 1, 3-4.

Díaz-Ambrona, C.G.H. (ed.). (1998b). *La dehesa, aprovechamiento sostenible de los recursos naturales*. Madrid: Fundación Premio Arce, Caja Madrid y Editorial Agrícola Española.

Donaire, J. J. S. (2007). The xerochoric index: a geographical indicator of precipitation drought (Spain and Poland). *Estudios geográficos*, 263, 679.

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 24. Land and Water Development Division, FAO, Rome, 144.

Edwards, D. C. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales* (No. AFIT-97-051). Air Force Inst of Tech Wright-Patterson AFB OH.

Flynn E. S. (2006). *Using NDVI as a pasture management tool*. Master Thesis. University of Kentucky.

Gao, B. C. (1996). NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

Hayes, M. J. (2006). *Drought indices*. John Wiley & Sons, Inc.. New York.

Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.

Larson, H. (1982). Introduction to probability theory and statistical inference. New York: John Miley.

Levkowitz, H. (1997). *Color Theory and Modelling for Computer Graphics, Visualization and Multimedia Applications*. Norwell (Massachusetts): Kluwer Academic Publishers.

Loomis, R. S., Connor, D. J. (2002). *Ecología de Cultivos*. Madrid: Mundi Prensa.

Lovejoy, S., A.M. Tarquis, H. Gaonac'h and D. Schertzer. *Single and Multiscale remote sensing techniques, multifractals and MODIS derived vegetation and soil moisture*. Vadose Zone Journal, 7(2), 533-546, 2008.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2013a) Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan de Seguros Agrarios Combinados para el ejercicio 2014 de 27 de diciembre publicada el 31 de diciembre de 2013. *Boletín Oficial del Estado*. 313. Xec III. 107208-107221

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2013b) Orden AAA/1129/2013 de 7 de Junio publicada el 18 de junio de 2013. *Boletín Oficial del Estado*. 145. Sec III. 46077-46100

Martín-Sotoca, J.J. (2014) *Estructura Espacial de la Sequía en Pastos y sus Aplicaciones en el Seguro Agrario*. Master Thesis, UPM.

Martin-Sotoca, J.J., Antonio Saa-Requejo, Javier Borondo, Ana M. Tarquis. *Spatial variability of NDVI at different seasons in the Community of Madrid (Spain)*. Geophysical Research Abstracts, 17, EGU2015-14938-2, 2015a.

Martín-Sotoca, J.J., Antonio Saa-Requejo, Carlos G.H. Díaz-Ambrona, Ana M. Tarquis. *NDVI statistical distribution of pasture areas at different times in the Community of Madrid (Spain)*. Geophysical Research Abstracts, 17, EGU2015-14943-2, 2015b.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.

McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J: *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, Anaheim, CA, Am. Meteorol. Soc., 179–184, 1993.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1995. *Drought monitoring with multiple time scales*. Preprints, 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, TX, pp. 233-236.

Mielke Jr, P. W. (1975). Convenient beta distribution likelihood techniques for describing and comparing meteorological data. *Journal of Applied Meteorology*, 14(6), 985-990.

Mielke Jr, P. W. (1976). Simple Iterative Procedures for Two-Parameter Gamma Distribution Maximum Likelihood Estimates. *Journal of Applied Meteorology*, 15, 181-182.

NASA-USGS. (2014). LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center). Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m. *NASA and USGS*. Descargado el 14/7/15 de https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09a1

Onema, J. M. K., & Taigbenu, A. (2009). NDVI–rainfall relationship in the Semliki watershed of the equatorial Nile. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13), 711-721.

Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1), 71-75.

Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.

Robledo, A., F. Alcaraz, E. Correal, M. Erena y P. García. *Tipología de los pastos naturales de la Región de Murcia*. Capítulo 3, 25-40, 2014. En: Tipificación, cartografía y evaluación de los recursos pastables de la Región de Murcia, Informe #18, Consejería de Agricultura y Agua, Región de Murcia.

Royston, P. (1992). Approximating the Shapiro-Wilk W-Test for non-normality. *Statistics and Computing*, 2(3), 117-119.

Saa Requejo, A. , (1991). *Modelo de distribución espacial y de frecuencia de la precipitación en la Península Ibérica*. Tesis doctoral. TSI Ingenieros Agrónomos UPM

San Miguel Ayanz, A. (2001) *Pastos naturales españoles*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa , 2001.

Schwab, G. J., Pena-Yewtukhiw, E. M., Wendroth, O., Murdock, L. W., Stombaugh, T., & Stafford, J. V. (2005). Wheat yield population response to variable rate N fertilization strategies using active NDVI sensors. In *Precision agriculture'05. Papers presented at the 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden*. (pp. 235-242). Wageningen Academic Publishers.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 527(3-4), 591-611.

Apéndice 1: Test Shapiro-Wilk

En esta tabla se detallan los resultados del test de Shapiro Wilk en cada zona y periodo de tiempo.

Fecha	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		Probabilida d
	Test SW	Probabilida d	Test SW	Probabilida d	Test SW	Probabilida d	Test SW	Probabilida d	
1	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.016
2	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0.026	Fallo	0.007
3	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0.003	Fallo	0.006
4	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.154
5	Fallo		0	Fallo	0	Acierto	0.097	Fallo	0.013
6	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.011
7	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.005
8	Fallo		0	Fallo	0	Acierto	0.472	Fallo	0.003
9	Fallo		0	Fallo	0	Acierto	0.115	Acierto	0.293
10	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.003
11	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0.001	Fallo	0.047
12	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.015
13	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.015
14	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.049
15	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.066
16	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.053
17	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.059
18	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.043
19	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.315
20	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.084
21	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.012
22	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.073
23	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.083
24	Acierto	0.151		Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.056
25	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.016
26	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.063
27	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.002
28	Fallo	0.01		Acierto	0.07	Fallo	0	Fallo	0.02
29	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.001
30	Fallo	0.001		Acierto	0.075	Fallo	0	Fallo	0.024
31	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.002
32	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0
33	Fallo		0	Fallo	0.014	Fallo	0	Acierto	0.818
34	Fallo		0	Fallo	0.001	Fallo	0	Fallo	0.019
35	Fallo	0.006		Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.189
36	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.148
37	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.297
38	Fallo		0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.002

39	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.038
40	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.006	Acierto	0.189
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
Fecha	Test SW	Probabilidad						
41	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.156	Acierto	0.066
42	Fallo	0	Fallo	0	Acierto	0.082	Fallo	0.001
43	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.001	Acierto	0.229
44	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.004	Acierto	0.131
45	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.045	Acierto	0.07
46	Fallo	0	Fallo	0	Fallo	0.003	Acierto	0.064

Apéndice 2. Resultados análisis factorial con máximos y mínimos.

En las siguientes tablas se muestra el análisis factorial realizado con máximos y mínimos.

	Zona 1				Zona 2			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Eto	0.13	-0.41	0.04	0.76	0.05	-0.28	0.91	0.03
Prec 1 periodo	-0.02	0.81	0.11	0.14	0.10	0.92	0.05	0.07
Tmed	0.12	-0.34	0.02	0.85	0.12	-0.22	0.90	-0.08
Prec 2 periodo	-0.05	0.86	0.04	0.14	0.05	0.79	-0.01	0.07
PI5mm	0.08	-0.67	0.01	0.10	0.10	-0.52	0.18	-0.06
PI10mm	0.07	-0.71	0.01	0.08	0.08	-0.53	0.14	-0.07
P/Eto	-0.04	0.74	0.04	-0.03	0.09	0.84	-0.10	0.02
Prec 4 periodo	-0.12	0.74	-0.02	0.09	-0.12	0.59	-0.07	0.08
NDVImed	-0.89	0.21	-0.04	-0.04	-0.80	0.22	-0.25	0.35
NDVImax	-0.77	0.22	-0.04	-0.26	-0.62	0.12	-0.20	0.70
NDVImin	-0.83	0.08	-0.02	0.19	-0.95	0.14	-0.15	-0.07
NDWImed	0.17	0.04	-0.04	0.02	-0.01	0.03	-0.02	0.18
NDWImax	0.00	0.04	-0.02	0.10	0.00	0.04	0.12	0.16
NDWImin	0.02	-0.04	0.00	-0.11	-0.11	-0.01	-0.08	0.04
NDDImed	-0.01	0.06	1.00	-0.04	0.17	0.14	-0.03	-0.09
NDDImax	-0.01	0.06	1.00	-0.04	0.18	0.13	-0.06	-0.04
NDDImin	-0.09	0.08	0.01	0.13	-0.15	-0.01	0.02	0.03
NDWUmed	0.96	-0.10	0.02	-0.06	0.85	-0.14	0.13	-0.21
NDWUmax	0.75	0.04	-0.01	-0.18	0.86	0.01	-0.03	0.27
NDWUmin	0.90	-0.14	0.04	0.03	0.70	-0.07	0.11	-0.69

	Zona 3				Zona 4			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Eto	0.00	0.57	-0.25	0.37	0.66	0.36	0.05	-0.15
Prec 1 periodo	-0.01	-0.05	0.94	-0.16	-0.05	-0.21	0.01	0.94
Tmed	-0.03	0.69	-0.16	0.38	0.67	0.36	0.10	-0.07
Prec 2 periodo	-0.07	-0.04	0.71	-0.36	-0.05	-0.38	-0.03	0.67
PI5mm	0.06	0.14	-0.28	0.88	0.18	0.89	0.09	-0.20
PI10mm	0.09	0.10	-0.31	0.89	0.17	0.91	0.09	-0.22
P/Eto	0.04	-0.15	0.90	-0.09	-0.16	-0.12	0.06	0.84
Prec 4 periodo	-0.13	-0.08	0.42	-0.54	-0.14	-0.51	-0.08	0.41
NDVImed	-0.82	0.49	0.10	-0.14	-0.80	-0.24	-0.50	-0.08
NDVImax	-0.45	0.89	0.05	0.02	-0.90	-0.24	-0.32	-0.05
NDVImin	-0.83	-0.07	0.09	-0.15	-0.42	-0.12	-0.85	-0.06
NDWImed	-0.07	0.52	-0.04	0.03	-0.18	-0.19	0.05	0.03
NDWImax	0.09	0.18	-0.04	-0.03	-0.03	-0.09	0.07	-0.04
NDWImin	-0.05	0.01	-0.04	0.06	-0.15	0.00	-0.03	0.05
NDDImed	0.41	-0.35	0.03	0.13	0.28	0.26	0.11	0.07
NDDImax	0.05	-0.01	0.02	0.09	0.02	0.02	0.02	0.13
NDDImin	-0.09	-0.06	-0.01	-0.05	-0.06	0.02	0.02	0.05
NDWUmed	0.91	-0.37	-0.04	0.04	0.76	0.13	0.59	0.12
NDWUmax	0.84	0.02	0.02	-0.01	0.31	-0.02	0.94	0.12
NDWUmin	0.56	-0.79	-0.04	-0.05	0.91	0.15	0.25	0.06