

CASO PRÁCTICO

Caracterización del estado de los ecosistemas terrestres a través de las variaciones interanuales de RUE (*Rain Use Efficiency*)

Marina Simó-Martí ^{1*}, Beatriz Martínez ², María Amparo Gilabert ²

¹Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT). Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain.

²UV-Environmental Remote Sensing Group (UV-ERS). Departament de Física de la Terra i Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València. Dr. Moliner, 50. 46100. Burjassot. València, Spain.

Resumen: La degradación de los ecosistemas se ha intensificado en las últimas décadas y se prevé que el cambio climático incremente su riesgo, sobre todo en los ecosistemas áridos y semiáridos. El objetivo de este trabajo es la caracterización del estado de los ecosistemas terrestres del territorio español peninsular y las Islas Baleares a través del análisis temporal de la variable RUE (*Rain Use Efficiency*) durante el periodo 2004-2018. Las imágenes de RUE anual se han calculado como el cociente entre la producción primaria bruta (GPP) anual y la precipitación acumulada (PPT) anual a una resolución espacial de 1 km, y posteriormente se han normalizado los valores. La GPP anual se deriva de la GPP diaria, obtenida por medio de datos satelitales (método de Monteith) y la PPT a partir de las imágenes de precipitación diaria, que proceden de aplicar una interpolación espacial *kriging* a los datos de las estaciones de la red de AEMet. El análisis temporal de la RUE se ha realizado calculando su pendiente con el test de *Mann-Kendall* y el método de *Sen-Theil*. La RUE se ha analizado a tres niveles de estudio: a nivel regional, por tipos de vegetación y a nivel de píxel. Los resultados han mostrado una tendencia negativa de la RUE normalizada (entre $-0,05$ y $-0,25$ año⁻¹) para la mayoría del territorio, para las 9 clases de vegetación (siendo las clases forestales las que han presentado las pendientes más acusadas) y en 5 de los 8 ecosistemas analizados a nivel de píxel. Un declive en la RUE indica cierta degradación en la cubierta vegetal. Del análisis de los resultados se ha extraído que la variabilidad interanual de la RUE se encuentra mediada en gran parte por la precipitación (correlación negativa). Se ha observado que la GPP ha experimentado en los últimos años un incremento progresivo conocido como *greening*.

Palabras clave: RUE, GPP, degradación de los ecosistemas, precipitación anual.

Characterization of terrestrial ecosystems state based on interannual variations of RUE (*Rain Use Efficiency*)

Abstract: Ecosystems degradation has intensified in recent decades and climate change is expected to increase the risk of such processes in the coming years, especially in arid and semi-arid ecosystems. The purpose of this work is to characterize the state of the terrestrial ecosystems of the Spanish mainland and the Balearic Islands through the temporal analysis of the variable RUE (*Rain Use Efficiency*) during the period 2004-2018. Annual RUE images have been calculated as the quotient between annual gross primary production (GPP) and annual cumulative precipitation (PPT) in a 1 km spatial resolution, and the values have been later normalized. The annual GPP is derived from the daily GPP, obtained using satellite data (Monteith method) and the PPT from daily precipitation images, which are computed by applying a *kriging* to the data from AEMet network stations. Temporal analysis

To cite this article: Simó-Martí, M., Martínez, B., Gilabert, M.A. 2023. Characterization of terrestrial ecosystems state based on interannual variations of RUE (*Rain Use Efficiency*). *Revista de Teledetección*, 62, 71-88. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19980>

* Corresponding author: msimmar@upv.es

of the RUE has been made by calculating the slope from a Mann-Kendall test and Sen-Theil method. RUE has been analyzed at three levels of study: at regional level, by vegetation types and at pixel level. The results have shown a negative trend of the normalized RUE (between -0.05 and -0.25 year⁻¹) for most of the area, for the 9 classes of vegetation (the forest classes being the ones that have presented the steepest slopes) and in 5 of the 8 ecosystems analyzed at pixel level. A decline in the RUE indicates some degree of degradation in vegetation cover. From the analysis of the results it has been extracted that the interannual variability of the RUE is largely mediated by precipitation, presenting a negative correlation. On the other hand, it has been observed that GPP has experienced a progressive increase in recent years known as greening process.

Key words: RUE, GPP, ecosystems degradation, annual precipitation.

1. Introducción

La degradación de los ecosistemas, entendida como la reducción persistente en su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos (Chopra *et al.*, 2005), se ha incrementado en las últimas décadas según el informe especial *Climate Change and Land* del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019). Una degradación causada directa e indirectamente por procesos antropogénicos, siendo también el cambio climático uno de sus agravantes. La variable RUE (*Rain Use Efficiency*) se suele utilizar como *proxy* para evaluar la contribución del clima a la degradación de los ecosistemas terrestres, sobre todo en los semiáridos, pues permite reconocer la respuesta de la producción de las plantas ante las variaciones en la precipitación (Matin y Behera, 2019). La RUE se define como el cociente entre la producción primaria neta aérea (NPP) de un ecosistema y la precipitación total acumulada, es decir, el número de kilogramos de fitomasa (o biomasa vegetal) aérea seca producida por unidad de superficie, por unidad de tiempo y por mm de precipitación en forma de lluvia (Holm *et al.*, 2003; Huang y Xu, 2016).

La NPP es la ganancia neta de carbono por la vegetación y es igual a la diferencia entre el carbono ganado por la producción primaria bruta (GPP), esto es, el carbono fijado por fotosíntesis, y el carbono liberado por la respiración de la planta (también denominada respiración autotrófica): $NPP = GPP - R_{\text{planta}}$. La respiración proporciona la energía para que una planta adquiera nutrientes y produzca y mantenga biomasa. La cuantificación de los gastos de respiración de un sistema suele ser costosa y poco precisa, lo que determina que la obtención de NPP por teledetección no sea inmediata. Algunos trabajos la estiman de forma

aproximada a través de correlaciones con el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) (Fensholt y Rasmussen, 2011; Huang y Xu, 2016). Otra alternativa es utilizar en su lugar la GPP, cuya obtención utilizando datos de observación de la Tierra está bien documentada en bibliografía. Habitualmente se utiliza el modelo de Monteith (véase, por ejemplo, Gilabert *et al.*, 2015), que vincula la GPP directamente con la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación.

El estudio de imágenes de la variable RUE a lo largo del tiempo permite conocer su evolución espacio-temporal y servir como índice de evaluación del estado de los ecosistemas ante el cambio climático. La Península Ibérica, aunque muy heterogénea, es eminentemente una zona semiárida y, por lo tanto, muy vulnerable al cambio climático; por este motivo se hace imprescindible evaluar el estado y la evolución de sus ecosistemas terrestres.

El análisis del estado de los ecosistemas mediante la variable RUE no es nuevo y, actualmente, son numerosos los trabajos existentes en todo el mundo, como es el caso de China (Huang y Xu, 2016), el Sahel (Fensholt y Rasmussen, 2011; Dardel *et al.*, 2014), Australia (Holm *et al.*, 2003), o América (Huxman *et al.*, 2004). Sin embargo, no existe ningún estudio reciente que analice la variación de la RUE en la Península Ibérica. Además, este estudio complementa otros trabajos existentes sobre el análisis de los ecosistemas de la península a partir de otras variables, como por ejemplo la CUE (*Carbon Use efficiency*) (Cañizares *et al.*, 2017); índices de desertificación (Paniagua *et al.*, 2019); o el NDVI (Martínez y Gilabert, 2009) y la GPP (Sánchez-Ruiz, 2019, Martínez *et al.*, 2022).

El objetivo principal de este trabajo consiste en la caracterización del estado de los ecosistemas del

territorio español peninsular y las Islas Baleares a través del análisis temporal de la variable RUE para el periodo 2004-2018. Como *proxy* de la RUE se utilizará el cociente entre la GPP y la precipitación. A partir de datos de observación de la Tierra (EO, *Earth Observation*) y datos meteorológicos se obtendrá la serie temporal RUE para el periodo de estudio a una resolución espacial de 1 km.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

La zona de estudio engloba el territorio español de la Península Ibérica y las islas Baleares, en el extremo occidental de Europa, rodeada por los mares Mediterráneo (SE y E) y Cantábrico (N) y por el océano Atlántico (SO, O, NO), aproximadamente en el cuadrante 44° – 36° de latitud N, y 10°W – 3°E de longitud. Las condiciones climáticas varían en cada zona, pero en general, las temperaturas más elevadas se dan en julio y agosto (enero es el mes más frío), y la precipitación anual

tiende a disminuir de N a S y de O a E, con medias anuales que varían entre los 150 mm y más de 2500 mm.

La vegetación es heterogénea y diversa, pues se encuentra muy ligada a las condiciones climáticas de cada zona: bosques densos en el norte húmedo y vegetación menos frondosa y adaptada al clima seco en la zona mediterránea. Aparte de esta unidad de estudio, se han seleccionado ecosistemas con características homogéneas y particulares dentro de una extensión de 3×3 píxeles cada uno, siendo la extensión de cada píxel de 1 km². En total, ocho emplazamientos (“Zonas” a partir de ahora) de 9 km² cada uno han sido estudiados (Figura 1).

2.2. Datos

Los datos utilizados se resumen en la Tabla 1.

El cálculo de la variable RUE a nivel anual se ha llevado a cabo a partir de los datos de RUE

Tabla 1. Datos utilizados en la investigación.

Variable	Tipo de dato	Resolución espacial	Resolución temporal	Fuente
GPP	Satelital y meteorológica	1 km	Diaria	Producto desarrollado por el equipo de investigación UV-ERS
PPT	Meteorológica	1 km	Diaria	AeMet
SPI	Meteorológica	1 km	Diaria	AeMet
Mapa de cobertura	Cartográfica	1 km	-	Pérez-Hoyos <i>et al.</i> (2012)

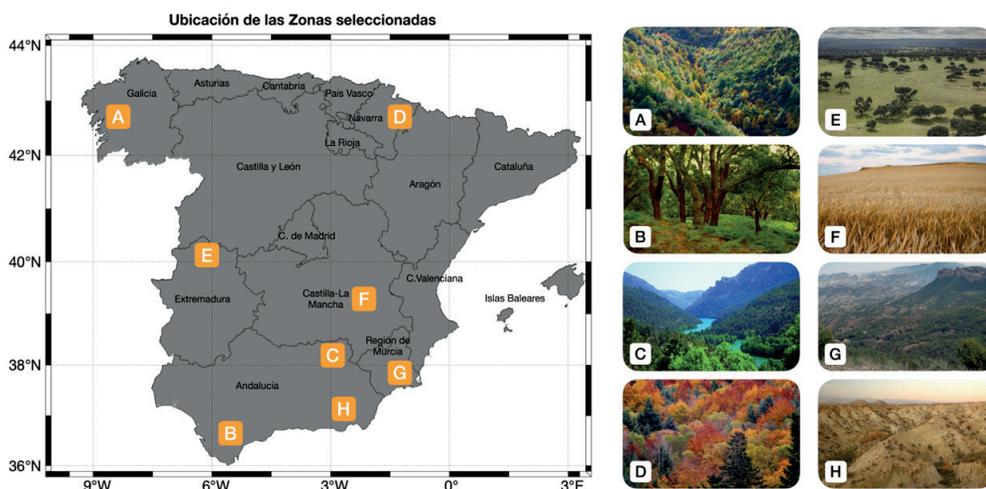


Figura 1. Ubicación de los ecosistemas seleccionados e imágenes correspondientes. Se muestran también los límites y los nombres de las comunidades autónomas.

diarios, obtenidos a partir de la GPP y PPT diarias a 1 km de resolución espacial.

La GPP diaria se ha obtenido a partir de una adaptación del modelo de Monteith (Gilbert *et al.*, 2015). En concreto, este modelo relaciona la GPP diaria ($\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación según la siguiente relación:

$$\text{GPP} = \text{PAR} f_{\text{APAR}} \varepsilon \quad (1)$$

siendo PAR la densidad de flujo de radiación fotosintéticamente activa en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, f_{APAR} la fracción PAR absorbida (adimensional), y ε o LUE (*Light Use Efficiency*) la eficiencia de la cubierta en el uso de la radiación en g MJ^{-1} .

En particular, f_{APAR} se obtiene a partir del índice de vegetación RDVI, que utiliza las reflectividades en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, que se calculan a partir de los parámetros (k_0 , k_1 and k_2) de la BRDF del producto MCD43A1. La PAR diaria es el 46% de la irradiación diaria, resultado de integrar a lo largo del día el producto DSSF del SEVIRI/MSG, que después ha sido remuestreado a la resolución de trabajo, $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. Por su parte, depende del tipo de vegetación (datos tabulados), así como del estrés hídrico, que se cuantifica utilizando datos de precipitación y de evapotranspiración. En Gilbert *et al.* (2015) se puede encontrar una descripción detallada del procedimiento.

Las imágenes de PPT diaria ($\text{L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) a 1 km de resolución se han obtenido al aplicar el método geoestadístico *kriging* ordinario a los datos diarios de 400 estaciones meteorológicas de la red de AEMet (Agencia Estatal de Meteorología).

Además, se ha hecho uso de información auxiliar para profundizar en el análisis de la variabilidad de la RUE como: datos del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) e información sobre la clasificación de la cobertura vegetal (Pérez-Hoyos *et al.*, 2012).

La serie temporal de precipitación se ha transformado en el SPI para una mejor interpretación de los resultados. El SPI indica el número de desviaciones estándar de la precipitación respecto a la media a lo largo del periodo de acumulación considerado una vez la distribución original de la precipitación que ha sido transformada a una

distribución normal (McKee *et al.*, 1993). La escala temporal para su cálculo ha sido de 12 meses.

El mapa híbrido de cobertura vegetal corresponde a una combinación sinérgica de cuatro bases de datos de cobertura del suelo: CORINE, CGL2000 (*Global Land Cover* 2000), MODIS (MOD12Q1 V005) y *GlobCover* (Pérez-Hoyos *et al.*, 2012) (Anexo I).

2.3. Metodología

La metodología llevada a cabo consta de tres etapas: 1) exploración de los datos de GPP y PPT diarios a partir del cálculo de la tendencia y valores medios anuales, 2) cálculo de la RUE anual para el periodo considerado y normalización de los datos y, 3) análisis de la tendencia de la serie RUE a nivel regional, por tipos de vegetación y a nivel de píxel.

2.3.1. Series GPP y SPI diarias

Previo al análisis de la tendencia con datos diarios se ha realizado un pre-procesado a los datos. Este consiste en aplicar un filtro de media móvil (Weng, 2018) para suavizar las fluctuaciones diarias y estacionales. El análisis de la tendencia de los datos de GPP y SPI diarios se ha realizado a partir del método no paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1985) junto con el método Sen-Theil (Sen, 1968) con un nivel de significación del 95%. El test de Mann-Kendall computa un coeficiente que representa la fuerza y dirección de la tendencia para un conjunto de datos espacializados uniformemente, e indica si es estadísticamente significativa (Burkey, 2021). Por otro lado, la magnitud del cambio detectado viene dada por la pendiente no paramétrica obtenida con el método de Sen-Theil. El error asociado a la pendiente se ha definido y calculado de la siguiente forma:

$$\text{error} = \frac{(|sen| - |CI_{\text{inferior}}|) + (|CI_{\text{superior}}| - |sen|)}{2} \quad (2)$$

donde *sen* es el valor de la pendiente, y CI_{inferior} y CI_{superior} son respectivamente los intervalos de confianza inferior y superior.

2.3.2. RUE anual

La RUE se ha obtenido calculando el cociente entre la GPP anual y la PPT anual, previamente

obtenidas a partir del sumatorio de los datos diarios de GPP y PPT:

$$RUE = \frac{GPP}{PPT} \quad (3)$$

Considerando que la densidad del agua es, aproximadamente, igual a 1 g cm^{-3} (es decir, 1 kg L^{-1}), la RUE anual es adimensional e indica, por cada unidad de superficie, la masa (kg) de carbono que se fija por fotosíntesis por cada kg de agua precipitada, a lo largo de un año.

Con el fin de estandarizar la RUE, es decir, que el valor de RUE signifique lo mismo en una zona u otra de la península (independientemente del régimen de pluviosidad), se ha normalizado la serie a una distribución *z-score* de la siguiente forma:

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (4)$$

donde x es el valor de RUE anual de cada píxel, y μ y σ son la media y la desviación estándar, respectivamente, de las 15 imágenes de RUE anual.

2.3.3. Análisis de tendencia de la serie RUE

El análisis de la tendencia de la serie RUE anual también se ha llevado a cabo a partir del método Mann-Kendall, pero en este caso se ha aplicado un nivel de significancia del 70%. Se ha disminuido el nivel de significancia dado que la serie temporal corresponde a valores anuales de la RUE y por tanto el análisis de la tendencia sólo se lleva a cabo a partir de 15 imágenes. Los cambios experimentados por la variable RUE se han estudiado (i) a nivel regional (toda el área de estudio), (ii) teniendo en cuenta las diferentes clases de vegetación por separado y (iii) a nivel local para las 8 Zonas descritas en la Tabla A1 del Anexo I. En general, la variabilidad interanual de la RUE muestra valores estables a lo largo del tiempo (pendiente = 0) en ecosistemas en buen estado de conservación, mientras que en ecosistemas en proceso de degradación los valores de RUE disminuyen a lo largo de los años (pendiente < 0) (Dardel *et al.*, 2014).

3. Resultados

3.1. GPP y SPI: distribución espacial y análisis de la tendencia interanual

Los valores medios obtenidos y las pendientes calculadas se muestran en el Anexo I (Figura A2).

Los valores medios de GPP más elevados se dan en el N de la península y en los Pirineos y NE de Cataluña ($>4 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), coincidiendo con las áreas de bosque más denso y que reciben más precipitación (valores positivos de SPI). En general, la tendencia obtenida con el test de Mann-Kendall de ambas variables ha sido positiva con pendientes medias de $0,0021 \pm 0,0002 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-2}$ (GPP), y de $0,003 \pm 0,002 \text{ año}^{-1}$ (SPI). El área de tendencia negativa de la GPP supone solo un 22% de los píxeles (concentrados en la costa Mediterránea), y el de tendencia positiva un 78%. La tendencia del SPI muestra una disminución de las precipitaciones en Castilla y León, Castilla-La Mancha y al S de la península, y un incremento en las regiones del N, sobre todo en los Pirineos. El área de tendencia negativa de la SPI supone un 44% de los píxeles, y la de tendencia positiva un 56%. Los píxeles estadísticamente significativos en el test de Mann-Kendall son más numerosos en el caso de la GPP (91%) que del SPI (68%).

3.2. RUE: distribución espacial y tendencia interanual a nivel regional

La Figura A3 (Anexo I) muestra el valor de la RUE anual para cada año del periodo 2004-2018 para toda la zona de estudio. Esta variación interanual tan marcada depende a la vez de la variación interanual de la GPP y la PPT (Figura 2). Destacan los años 2007, 2015 y 2017 con los valores medios de RUE más elevados del periodo. Considerando los valores medios anuales de las tres variables (Figura 2) se aprecia que los años mencionados presentan una RUE muy elevada a causa de los valores bajos de PPT de esos años. Por el contrario, en 2010 y 2018 la RUE presenta los valores medios más bajos del periodo, coincidiendo con los años con más lluvia acumulada.

La tendencia de la RUE normalizada es negativa, con una pendiente media de $-0,06 \text{ año}^{-1}$. Esta tendencia negativa a nivel regional se ha obtenido calculando la media de las pendientes de todos los píxeles (Figura 3). En concreto, solo un 33% de los píxeles analizados presenta una tendencia estadísticamente significativa, de los cuales un 74% muestran una pendiente de *Sen-Theil* negativa y solo un 26% positiva. Las zonas más destacables con una mayor concentración de píxeles con pendiente negativa son: NE de la península (los Pirineos y el interior de Cataluña),



Figura 2. Izquierda: evolución de los valores de GPP (puntos rojos) y PPT anuales (barras azules). Se ha mostrado también la pendiente de *Sen-Theil* media del periodo (*Sen's sl*) para los datos de GPP. Derecha: Evolución de los valores de RUE anuales normalizados. Se ha mostrado la pendiente de *Sen-Theil* media del periodo y la tendencia con una línea discontinua roja a efectos de visualización.

N de Castilla y León, algunas partes de Galicia, ciertas zonas del centro O de la península, N de la Comunidad Valenciana, Región de Murcia y la zona de Andalucía que limita con esta, y Mallorca en las Islas Baleares. Los valores de la pendiente se encuentran entre $-0,05$ y $-0,25$ año⁻¹. Las que presentan pendiente positiva son menos numerosas, pero podemos destacar ciertas zonas del S de Castilla y León, E de Cantabria y al S y O de Andalucía. Sus valores se encuentran alrededor de $0,05$ y $0,25$ año⁻¹. Respecto al error asociado a la pendiente (Figura 3) este se encuentra entre $0,008 - 0,111$.

3.3. Relación entre el tipo de vegetación y la RUE

La Figura 4 muestra la evolución de los valores anuales de RUE de las 9 clases de vegetación

(*z-score*). Los resultados se han agrupado en 3 gráficas independientes: (a) cultivos, (b) bosques, y (c) vegetación baja. El comportamiento de las 9 clases es bastante similar y no hay una diferencia significativa, con unos *z-scores* que varían entre $-0,9797$ y $1,1201$ desviaciones estándar. Esto se debe a que la distribución de los píxeles de cada clase se da a lo largo de toda la zona de estudio y no representan una zona homogénea con las mismas condiciones ambientales para cada píxel. Las 9 clases muestran prácticamente el mismo comportamiento que los valores anuales de RUE a nivel regional (Figura 2), con pendientes medias negativas (Tabla 2) que toman valores entre $-0,052$ año⁻¹ (en el caso de los cultivos de secano, la pendiente menos acusada) y $-0,089$ año⁻¹ (en el caso del bosque mixto, la pendiente más acusada). La magnitud de la pendiente de las clases de bosques es más elevada que el resto de clases

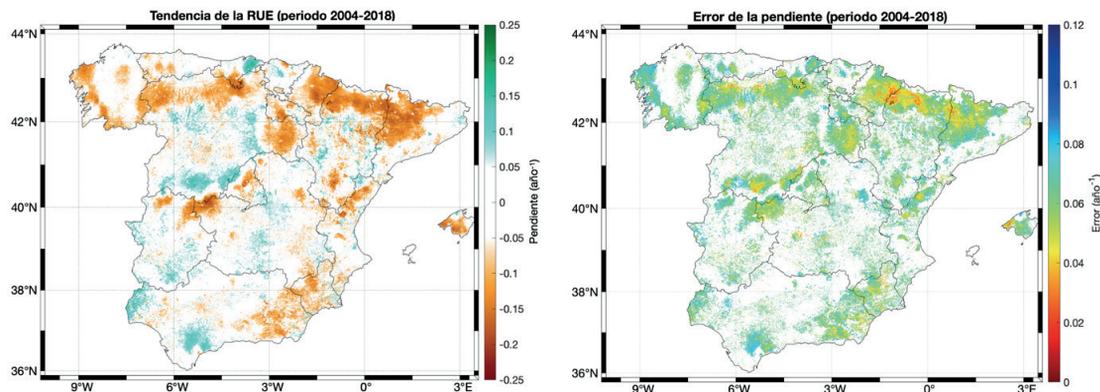


Figura 3. Imagen de la pendiente de la RUE normalizada (año⁻¹) obtenida con el test de Mann-Kendall y el método de *Sen-Theil* (izquierda) e imagen del error absoluto asociado (derecha).

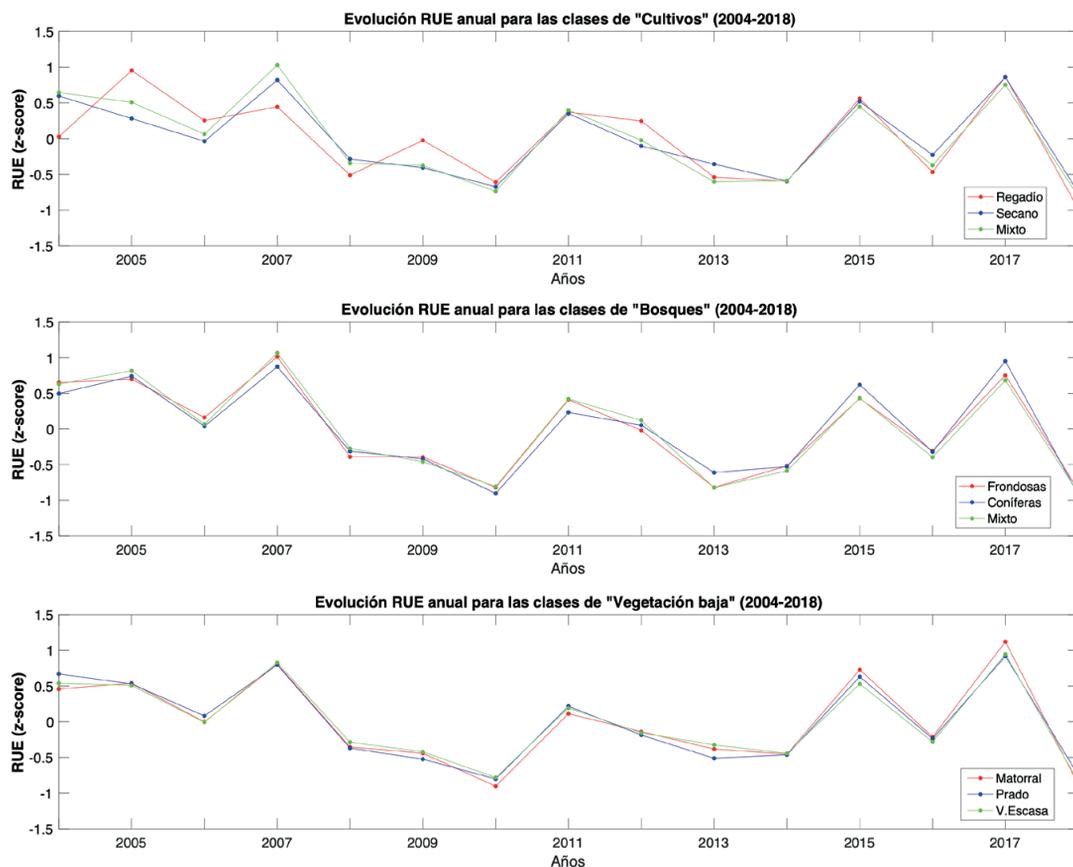


Figura 4. Evolución de los valores anuales de RUE normalizados para cada clase de vegetación.

estudiadas. Los valores de las pendientes de GPP (Tabla 2) muestran un crecimiento ligero sostenido en el tiempo para todas las clases, con pendientes positivas alrededor de $0,002 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-2}$. Los más elevados han sido para las clases de bosque mixto y de prados, y el más bajo para los cultivos de regadío.

3.4. Análisis de la RUE a nivel de ecosistemas particulares

Los resultados de la evolución de la RUE y de las variables GPP y PPT a nivel de píxel se muestran en gráficas independientes para cada Zona en la Figura 5. Los ecosistemas seleccionados han presentado comportamientos dispares:

Tabla 2. Valores de la pendiente de la GPP ($\text{kg m}^{-2} \text{ año}^{-2}$) y la RUE (año^{-1}) con su error absoluto para cada clase de vegetación.

Clases	Pendiente RUE	Error	Pendiente GPP	Error
Cultivos de regadío	-0,07	0,06	0,001	0,000
Cultivos de secano	-0,05	0,06	0,002	0,000
Mosaico de cultivos	-0,07	0,06	0,002	0,000
Bosque de frondosas	-0,08	0,06	0,002	0,000
Bosque de coníferas	-0,07	0,06	0,002	0,000
Bosque mixto	-0,09	0,06	0,002	0,000
Matorral	-0,06	0,06	0,002	0,000
Prado	-0,06	0,06	0,002	0,000
Vegetación escasa	-0,06	0,06	0,002	0,000

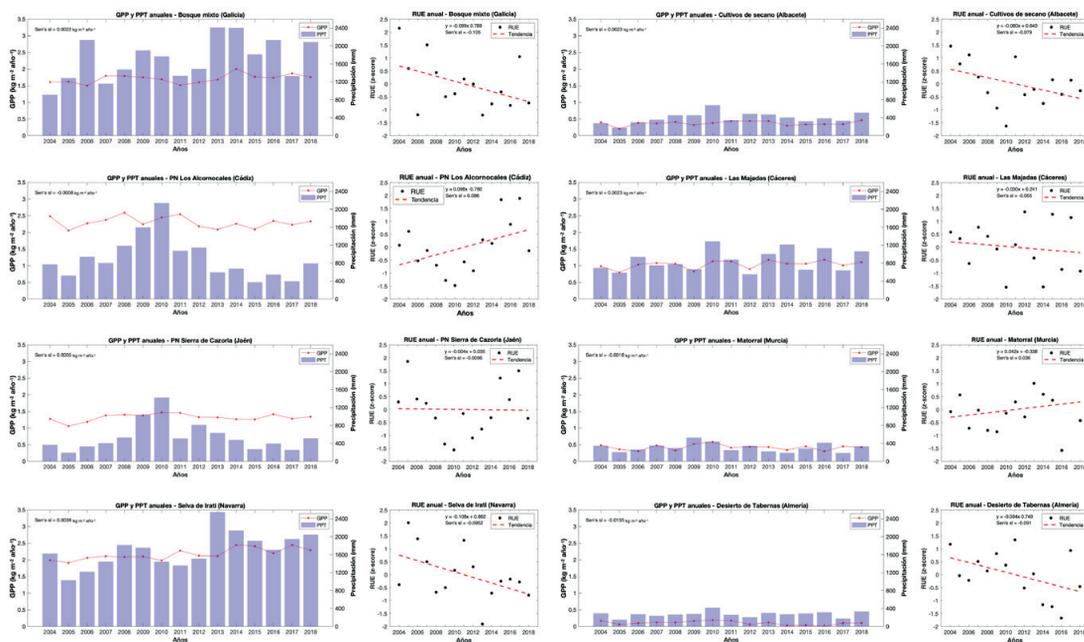


Figura 5. Evolución de la GPP, precipitación y RUE (valores anuales) para los Zonas: A, B, C, D, E, F, G y H. También se han representado los valores de la pendiente de *Sen-Theil* (*Sen's sl*) y la ecuación de la recta de regresión por mínimos cuadrados en el caso de la RUE, que simplemente se ha representado a efectos de visualización.

tendencias negativas en los Zonas A, D, E, F y H ($sen < 0,05$), tendencias positivas en la Zona B ($sen > 0,05$) y tendencias estables en los Zona C y G ($-0,05 < sen < 0,05$). De entre todos los resultados analizados es de especial interés comentar las Zonas A, B, C y G. La Zona A presenta una tendencia en la RUE bastante negativa ($0,1 \text{ año}^{-1}$), comportamiento que se corresponde con los resultados obtenidos anteriormente para la clase de bosque mixto (Tabla 2). Esta Zona presenta los *z-score* más elevados de RUE en 2004, 2007 y 2017, coincidiendo con los años más secos. Hay que destacar que los valores anuales de GPP se mantienen bastante estables a lo largo de los 15 años estudiados (entre $1,70$ y $1,98 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), a excepción de los picos de 2007 y 2014, donde la GPP es mayor (en ambos casos el año previo había sido muy húmedo). La Zona B presenta una pendiente positiva para la RUE normalizada ($0,08 \text{ año}^{-1}$), mayor que la pendiente obtenida para la clase BF como conjunto. Esto puede explicarse en gran medida porque los últimos años del periodo 2004-2018 son más secos ($PPT < 800 \text{ mm}$) y muestran unos valores de RUE más elevados que el resto del periodo. Considerando la tendencia

de la GPP se aprecia una disminución muy ligera ($0,0008 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-2}$). La Zona C presenta una pendiente de *Sen-Theil* prácticamente alrededor de cero ($0,009 \text{ año}^{-1}$), indicando que el ecosistema se encuentra en una situación de estabilidad. Cabe destacar los años 2005, 2015 y 2017 con unos *z-score* por encima de 1, siendo el 2005 el que presenta la RUE más elevada de todos ($z\text{-score} = 1,857$) y a la vez el año en que menos precipitación recibe el ecosistema y menos fitomasa (GPP) se genera. Se evidencia así la dependencia de la GPP con la precipitación, pero también el aumento de la eficiencia en su uso cuando esta escasea. De manera opuesta, 2010 con la mayor precipitación recibida es el año que presenta el valor de RUE más pequeño para el periodo ($z\text{-score} = 1,56$). Los valores de GPP presentan cierta estabilidad y sin fluctuaciones marcadas, entre $1,06 - 1,47 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. La Zona G también presenta una GPP y una PPT reducidas, con valores parecidos a la Zona F. La relación entre ambas variables da como resultado una pendiente de RUE de $0,036 \text{ año}^{-1}$, por lo tanto se considera estable. La eficiencia en el uso de la lluvia es máxima en 2017 ($z\text{-score} > 2$), comportamiento que indica que para unos valores de GPP

constantes este tipo de ecosistema utiliza eficientemente una lluvia de 172 mm. Es destacable la variabilidad interanual del *z-score*, pues si 2017 era el año con el valor más elevado, 2016 es el año con el más bajo (1,58).

4. Discusión

4.1. Interrelación entre GPP y Precipitación

El estudio inicial de las variables GPP y PPT ha mostrado una clara correlación positiva espacialmente, tanto a nivel regional como a nivel local (Zonas como la Selva de Irati (D) o el bosque mixto de Galicia (A) reciben una precipitación anual más elevada que el resto de ecosistemas y en consecuencia la GPP también toma valores más elevados). Contrariamente, las Zonas F, G y H (Albacete, Murcia y Almería, respectivamente), más secas con precipitaciones anuales por debajo de los 400 mm, tienen una producción primaria que difícilmente supera los $0,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, pues su cubierta vegetal está compuesta por comunidades de plantas tolerantes al estrés hídrico y con una presencia escasa, lo cual resulta en una baja productividad. En el Anexo II se muestra la regresión lineal de los datos de GPP frente a los datos de precipitación a nivel local para cada Zona (Figura A4, Tabla A2), que corroboran lo obtenido en las imágenes regionales y en las Zonas. Varios estudios han obtenido resultados similares que evidencian esta dependencia espacial positiva entre GPP y PPT (Bai *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2019). En ellos se obtiene que la PPT es responsable de la variación de la NPP en un 76% (Bai *et al.*, 2008). Sin embargo, algunos autores remarcan que esta asunción no se cumple en términos temporales y que la respuesta de la GPP respecto a la variación de la precipitación a lo largo del tiempo varía según el tipo de ecosistema (Bai *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2014). En nuestro caso, sí que se aprecia esta correlación positiva temporal en las Zonas seleccionadas, aunque no de manera tan clara como la correlación espacial. Por otro lado, según el tipo de ecosistema (si es más árido o más húmedo) la correlación entre GPP y PPT varía: las Zonas más áridas (E, F y G) muestran una mayor correlación positiva y grado más elevado de dependencia entre la GPP y la PPT que los ecosistemas húmedos (Anexo II). En los gráficos de las Zonas E, F y G

se puede apreciar que la variación interanual de la PPT y la GPP es prácticamente la misma, allí donde la PPT se incrementa también lo hace la GPP. Este hecho se encuentra relacionado en parte con su eficiencia en el uso de la lluvia (RUE).

4.2. Variabilidad espacial y temporal de la RUE

Le Houérou (1984) presentó un valor estable de RUE alrededor de los $4 \text{ kg mm}^{-1} \text{ m}^2 \text{ año}^{-1}$ para los ecosistemas áridos y semiáridos. No obstante, en el presente trabajo la variable se ha analizado con los valores normalizados y, por tanto, la RUE se ha trabajado en términos de unidades de desviación estándar respecto a la media (*z-score*). El análisis de la RUE normalizada a diferentes niveles de estudio ha mostrado una evolución negativa de esta variable en la mayor parte de la zona de estudio. A nivel regional predominan los píxeles con una pendiente negativa. Este declive en la RUE indica que en los 15 años estudiados ha menguado la eficiencia de la cobertura vegetal de estas zonas para hacer uso del agua de la lluvia, evidenciando cierto grado de degradación, pues el rango de la pendiente (negativa) ha sido entre $-0,05$ y $-0,25 \text{ año}^{-1}$.

A nivel de clases de vegetación, las 9 clases seleccionadas mostraban esta disminución de RUE en mayor o menor medida, destacando las clases forestales (bosque mixto, bosque de frondosas y bosque de coníferas), con pendientes más negativas. Como era esperable, la variabilidad interclase no ha sido significativa al haber considerado toda la imagen. De hecho, en un estudio sobre la variabilidad de la CUE en el territorio peninsular español (Cañizares *et al.*, 2017), las clases de vegetación también muestran poca variabilidad interclase por el mismo motivo. De este modo, la caracterización de la RUE en función del tipo de vegetación presenta limitaciones si se considera toda la imagen. De aquí la necesidad de considerar ecosistemas con un nivel mayor de detalle que sí que pueden proporcionar un conocimiento más adecuado sobre el comportamiento de la vegetación que los conforma.

A nivel local, todos las Zonas han presentado una evolución negativa de la RUE o prácticamente sin cambio, a excepción del Parque Natural de Los Alcornocales, cuya evolución es bastante positiva.

El curioso comportamiento de este singular ecosistema se debe principalmente a las extraordinarias condiciones climatológicas de su enclave, dado que toda la zona de influencia presenta valores positivos de RUE. Este aumento en la eficiencia en el uso de la lluvia queda reflejado en la evolución interanual de su productividad, pues a pesar de que la precipitación anual media de todo el periodo (904 mm) es menor que la de las Zonas A y D (1710 y 1701 mm respectivamente), su GPP anual ($2,30 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) supera a la del Zona A en Galicia ($1,71 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y es prácticamente la misma que la del Zona D en Navarra ($2,17 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$). Este comportamiento muestra su capacidad de adaptación y el aumento de la eficiencia ante periodos de reducción de la precipitación.

El estudio regional y local de la RUE ha mostrado que su variabilidad interanual se encuentra mediada en gran medida por la precipitación, dado que los *z-score* más elevados se han obtenido en la mayoría de los casos en los años con valores de precipitación muy bajos y viceversa. Esta correlación negativa entre ambas variables también ha sido reportada en otros trabajos (Bai *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2019; Yan *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). En el Anexo II se muestra la regresión lineal entre RUE y precipitación que confirma esta correlación (Figura A5, Tabla A2). En esta misma línea, algunos autores también han definido los llamados *tipping points*. Según Chen *et al.* (2020), la RUE incrementa significativamente su valor cuando se amplifican los efectos de la sequía hasta llegar a un punto máximo, una vez logrado el cual la eficiencia del ecosistema empieza a disminuir. La RUE responde rápidamente a la sequía al inicio, pues inherentemente las plantas evitan la pérdida de agua con diferentes estrategias (reducción de zonas específicas de las hojas y cierre de los estomas). Sin embargo, cuando la sequía es extrema o prolongada, estos mecanismos de resistencia pueden limitar las tasas máximas de fotosíntesis, respiración y por último el crecimiento, pues el cierre de los estomas no solo evita la salida de agua sino que también dificulta la entrada de CO_2 a través de las hojas (Zhang *et al.*, 2020). Todo este conjunto de respuestas daría como resultado una disminución en la RUE. El periodo de estudio seleccionado no ha mostrado ningún ejemplo de este comportamiento, pero una sequía prolongada y severa podría provocar este resultado en las Zonas B y C, los cuales sí que han

sufrido una disminución de la lluvia significativa a partir de 2011.

Por otro lado, hay que destacar que el comportamiento de cada ecosistema ante la variación de la precipitación difiere. Los ecosistemas húmedos pueden mantener su producción primaria durante épocas de sequía debido a su baja sensibilidad a la variación en la disponibilidad del agua (Vicente-Serrano *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2020). En cambio, los áridos responden de una manera más plástica, con la acción de varios mecanismos fisiológicos y funcionales para evitar daños causados por el estrés hídrico. Es por eso que al estudiar la RUE en ecosistemas diversos es necesario considerar cuáles son los factores limitantes en cada uno, pues en los áridos y semiáridos el agua sí que lo es y por lo tanto su variación afecta directamente a la GPP, pero en cambio, en los húmedos no. En las Zonas más húmedas de nuestro trabajo (A y D) se observa que la variación de la precipitación anual no afecta en gran medida a la GPP. También hay otros factores que afectan a la RUE y que han sido reportados por Bai *et al.* (2008): la composición de la vegetación y la composición edáfica.

Finalmente, en cualquier estudio de la variación interanual de la RUE y los efectos de la PPT, también habría que considerar cómo es la distribución de la precipitación a lo largo del año, e.g. si aumenta solo en determinadas partes del año y si lo hace de manera torrencial o suave, puesto que sus efectos sobre la vegetación variarían. En el trabajo de Yan *et al.* (2013) se observa que el aumento de la precipitación ocurre solo en la estación de crecimiento tardío, lo cual promueve el cambio de la composición de las especies. Otro aspecto importante que los mismos autores remarcan es la diferenciación entre precipitación efectiva (la que es utilizada por la vegetación) y la no-efectiva (la que se evapora o se convierte en agua de escorrentía). Si el aumento de la PPT anual solo supone un aumento de la PPT no-efectiva la cobertura vegetal no será capaz de utilizar este agua para producir fitomasa (Chen *et al.*, 2020). Este podría ser el caso del Zona A y de la Zona D, pues a pesar del aumento de la PPT en los últimos años, parece que la comunidad vegetal no es capaz de utilizarla toda (RUE con una clara pendiente negativa). Esto podría ser debido a que parte de la precipitación es no-efectiva a causa de (i) la torrencialidad de las precipitaciones y la capacidad de infiltración y

retención del agua del propio suelo que convierten esta lluvia en agua de escorrentía (Ponce-Campos *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2014), o bien (ii), que la capacidad y eficiencia de la cobertura vegetal para hacer un uso efectivo disminuye debido a otros factores relacionados con el cambio climático (aumento de la temperatura, radiación...).

4.3. Incremento de la GPP: efecto *greening* global

El análisis de los resultados de la GPP muestra un incremento ligero pero sostenido en el tiempo de la producción primaria bruta durante los 15 años estudiados: a nivel regional predominan las áreas con pendiente positiva (78%); a nivel de clases de vegetación, todas ellas presentan una tendencia positiva, así como también 5 de los 8 Zonas. Este incremento podría identificarse con lo que muchos autores han definido como *greening*, un aumento de la biomasa vegetal causado, en gran parte, por el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, pues este produciría un efecto de fertilización sobre la vegetación (CO₂ *fertilization*) (Tang *et al.*, 2014; Keenan *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2016; Pan *et al.*, 2018; Sánchez-Ruiz *et al.*, 2019; Martínez *et al.*, 2022).

Según el IPCC (2019), con un alto grado de confianza los procesos de *greening* se han incrementado entre un 22-33% durante las últimas 3 décadas, sobre todo en China, India, muchas partes de Europa, Norteamérica, SE de Brasil y SE de Australia. Sin embargo, este *greening* que *a priori* puede considerarse como fenómeno positivo en términos ecológicos, parece que en algún momento llegará a algún punto de saturación y el proceso acabará revirtiéndose. De hecho, la pendiente negativa de la RUE evidencia cierta pérdida de eficiencia en el funcionamiento de los ecosistemas estudiados. Es evidente que la cubierta vegetal está aumentando su fitomasa, pero este hecho puede estar enmascarando un efecto de degradación también ligero y progresivo, que podría cambiar la dirección de la tendencia de la GPP y desembocar en procesos de *browning* (efecto contrario al *greening*), como muchos estudios ya han mostrado (Pan *et al.*, 2018; IPCC, 2019). La cuestión es hasta qué punto la GPP continuará incrementándose y si se logrará algún umbral del mismo modo que otros trabajos (Chen *et al.*, 2020) muestran un *tipping point* para la RUE.

5. Conclusiones

1. En los tres niveles de estudio la variable RUE presenta una marcada correlación negativa con la precipitación, hecho que muestra la alta capacidad de las plantas para adaptarse cuando el agua escasea. A su vez, la GPP presenta una correlación positiva con la precipitación. En cuanto a su tendencia, la GPP presenta un crecimiento ligero pero sostenido en el tiempo, comportamiento que se puede relacionar directamente con el proceso global de fertilización de CO₂ y el efecto *greening*.
2. Durante los 15 años estudiados, a nivel regional la variable RUE ha experimentado un declive en la mayoría del territorio estudiado, lo cual denota cierta degradación en la cubierta vegetal terrestre.
3. A nivel de clase de vegetación, los resultados obtenidos también han mostrado una tendencia negativa de la RUE para el periodo estudiado, siendo más acusada para las clases forestales. No se han encontrado diferencias significativas en la variabilidad interanual de la RUE entre clases a causa de haber considerado todos los píxeles de la imagen.
4. A nivel de píxel, los ecosistemas seleccionados han presentado comportamientos dispares en la evolución de la RUE, directamente relacionados con las condiciones climatológicas y el tipo de vegetación de cada enclave: 5 de las 8 Zonas han mostrado tendencias negativas, 2 las han mostrado estables y solo 1 ha mostrado una tendencia positiva. La mitad de las Zonas se encuentra en proceso de degradación.
5. La gran dependencia de la RUE con la precipitación hace que la variabilidad de esta última sea importante de estudiar, sobre todo en la actual situación de cambio climático. Es por eso, que hay que profundizar en el estudio de la RUE para entender como la cobertura vegetal responde y se adapta a los cambios dentro de este escenario de cambio global.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado con una Ayuda de colaboración en la investigación para estudiantes de la Universitat de València durante el curso 2020-2021. Este trabajo también se ha

realizado, en parte, gracias a la ayuda PID2020-118036RB-I00 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”. Se agradece a AEMet el suministro de los datos de precipitación.

Referencias

- Bai, Y., Wu, J., Xing, Q., Pan, Q., Huang, J., Yang, D., Han, X. 2008. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. *Ecology*, 89(8), 2140-2153. <https://doi.org/10.1890/07-0992.1>
- Burkey, J. 2021. Mann-Kendall Tau-b with Sen's Method (enhanced). En *MATLAB Central File Exchange*. Último acceso, 8 de Octubre, 2021, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11190-mann-kendall-tau-b-with-sen-s-method-enhanced>
- Cañizares, M., Moreno, A., Sánchez-Ruiz, S., Gilabert, M. 2017. Variabilidad de la eficiencia en el uso del carbono a partir de datos MODIS. *Revista de Teledetección*, 48, 1-12. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7044>
- Chen, Z., Wang, W., Yu, Z., Xia, J., Schwartz, F. 2020. The collapse points of increasing trend of vegetation rain-use efficiency under droughts. *Environmental Research Letters*, 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb332>
- Chopra, K., Leemans, R., Kumar, P., Simons, H. 2005. Ecosystems and human well-being: policy responses. En W. (. Analysis), *The millennium ecosystem assessment series vol. 3* (Vol. 3). Washington D.C.: Island Press.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougin, E., Ciais, P., Nguyen, C. 2014. Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sensing*, 6, 3446-3474. <https://doi.org/10.3390/rs6043446>
- Fensholt, R., Rasmussen, K. 2011. Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.014>
- Gilabert, A., Moreno, A., Maselli, F., Martínez, B., Chiesi, M., Shánchez-Ruiz, S.,... Carrara, A. 2015. Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.017>
- Holm, A., Cridland, S., Roderick, M. 2003. The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. *Remote Sensing of Environment*, 85, 145-158. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00199-2)
- Huang, F., Xu, S. 2016. Spatio-Temporal Variations of Rain-Use Efficiency in the West of Songliao Plain, China. *Sustainability*, 8(308). <https://doi.org/10.3390/su8040308>
- Huxman, T., Smith, M., Fay, P., Knapp, A., Shaw, R., Lolk, M.,... Williams, D. 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429, 651-654. <https://doi.org/10.1038/nature02561>
- IPCC. 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- Keenan, T.F., Colin Prentice, I., Canadell, J.G., Williams, C.A., Wang, H., Raupach, M., Collatz, G.J. 2016. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Communications*, 7, 13428. <https://doi.org/10.1038/ncomms13428>
- Kendall, M. 1985. *Rank correlation methods* (4th Edition ed.). London: Charles Griffin.
- Le Houérou, H.N. 1984. Rain use efficiency - A unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 213-247. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)31362-4](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)31362-4)
- Mann, H. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martínez, B., Gilabert, M. 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1823-1842. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.016>
- Martínez, B., Sánchez-Ruiz, S., Campos-Taberner, M., García-Haro, F.J., Gilabert, M.A. 2022. Exploring Ecosystem Functioning in Spain with Gross and Net Primary Production Time Series. *Remote Sensing*, 14(6),1310. <https://doi.org/10.3390/rs14061310>
- Matin, S., Behera, M. 2019. Studying evidence of land degradation in the Indian Ganga River Basin - a Geoinformatics approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 803. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7694-7>

- McKee, T., Doesken, N., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston: American Meteorological Society, pp. 179-184.
- Pan, N., Feng, X., Fu, B., Wang, S., Ji, F., Pan, S. 2018. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment*, 214, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.018>
- Paniagua, L., García-Martin, A., Moral, F., Rebollo, F. 2019. Aridity in the Iberian Peninsula (1960–2017): distribution, tendencies, and changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 811-830. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02866-0>
- Pérez-Hoyos, A., García-Haro, J., San-Miguel-Ayanz, J. 2012. A methodology to generate a synergetic land-cover map by fusion of different land-cover products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.011>
- Ponce-Campos, G., Moran, S., Huete, A., Zhang, Y., Bresloff, C., Huxman, T.,... Bosch, D. 2013. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. *Nature*, 494, 349-353. <https://doi.org/10.1038/nature11836>
- Sánchez-Ruiz, S., Martínez, B., Campos-Taberner, M., García-Haro, F., Gilabert, M. 2019. Análisis de tendencia en la GPP anual sobre la España peninsular. *XVIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, (pp. 249-252). Valladolid.
- Sen, P. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Sun, J., Zhou, T., Du, W., Wei, Y. 2019. Precipitation mediates the temporal dynamics of net primary productivity and precipitation use efficiency in China's northern and southern forests. *Annals of Forest Science*, 76, 92. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0876-1>
- Tang, X., Li, H., Desai, A., Nagy, Z., Luo, J., Kolb, T.,... Ammann, C. 2014. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on earth? *Scientific Reports*, 4, 7483. <https://doi.org/10.1038/srep07483>
- Vicente-Serrano, S., Gouveia, C., Camarero, J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J.,... Lorenzo-Lacruz, J. 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 110(1), 52-7. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>
- Weng, Q. 2018. *Remote Sensing Time Series Image Processing*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315166636>
- Yan, L., Luo, Y., Sherry, R., Bell, J., Zhou, X., Xia, J. 2014. Rain use efficiency as affected by climate warming and biofuel harvest: results from a 12-year field experiment. *GCB Bioenergy*, 6, 556-565. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12081>
- Zhang, X., Wang, J., Wu, C., Kuca, K. 2020. The spatial distribution patterns of rainfall use efficiency (RUE) of evergreen coniferous forests in Chinese subtropical zone. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48, 492-502. <https://doi.org/10.15835/nbha48111767>
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.,... Arneeth, A. 2016. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6, 791-795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

Anexo I

Tabla A1. Información detallada de cada ecosistema: cobertura vegetal, nombre y región y coordenadas geográficas.

Zona	Clase de vegetación	Región	Lat - Lon	Descripción
A	Bosque mixto	Galicia	42.71N, -8.60 E	Bosque mixto formado por coníferas y frondosas. Especies de pinos del país (<i>Pinus pinaster</i>), robles (<i>Quercus robur</i>), eucaliptos (<i>Eucalyotus</i> spp.). Elevada humedad y precipitación.
B	Bosque de frondosas	Parque Natural de Los Alcornocales (Cádiz)	36.49N, -5.51E	Extensión de alcornoques (<i>Quercus suber</i>) más meridional de Europa y más productiva de la Península, también cuenta con el roble o quejigo andaluz (<i>Quercus canariensis</i>) y bosques de laurisilva. Clima mediterráneo con precipitaciones muy abundantes y con un régimen de nieblas muy característico a causa de la elevada influencia marítima.
C	Bosque de coníferas	Parque Natural de La Sierra de Cazorla (Jaén)	38.37N, -2.55E	Reserva de la Biosfera en las Cordilleras Béticas. Clima mediterráneo subhúmedo, abundantes precipitaciones y orografía compleja (relieves kársticos). Crecimiento de extensos bosques de pinocha (<i>Pinus nigra</i>) mezclado con repoblaciones de pino carrasco y negral, y vegetación mediterránea (encinas, robles, sabinas...).
D	Bosque de frondosas	Selva de Irati (Navarra)	43.09N, -1.51E	Localizada en el Pirineo oriental navarro. Mayor masa forestal de la Península y segundo bosque de hayas (<i>Fagus sylvatica</i>) y abetos (<i>Abies amanezer</i>) más extenso de Europa. Clima continental con influencia atlántica, y un alto índice de lluvias (unos 1940 mm anuales) .
E	Prados	Las Majadas (Cáceres)	39.94N, -5.77E	Región caracterizada por grandes estepas de herbáceas y plantas aromáticas, alternando con dehesas (extensos bosques de encinas y alcornoques ampliamente separados) y zonas de cultivo de secano. Clima continental que impera con lluvias muy escasas e irregulares.
F	Cultivos de secano	Albacete	39.04N, -2.27E	Los cultivos predominantes son los cereales (trigo, avena y cebada), la vid y el olivo. La única aportación de agua que reciben estos cultivos es la de las irregulares lluvias típicas del clima mediterráneo continentalizado.
G	Matorral	Murcia	37.89N, -1.16E	Forma parte del Parque Regional de Carrascoy y lo Valle. Cobertura vegetal dominada por formaciones arbustivas y por pinos de repoblación (<i>Pinus halepensis</i>). Matorrales principalmente de esparto (<i>Stipa tenacissima</i>), romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>) y albaida (<i>Anthyllis cytisoides</i>).
H	Vegetación escasa	Desierto de Tabernas (Almería)	37.11N, -2.53E	Único desierto de Europa propiamente dicho. Paraje natural árido de unas 11 448 ha, precipitaciones muy escasas y torrenciales y temperaturas medianas superiores a los 17°C, Badlands muy erosionables y con vegetación escasa.

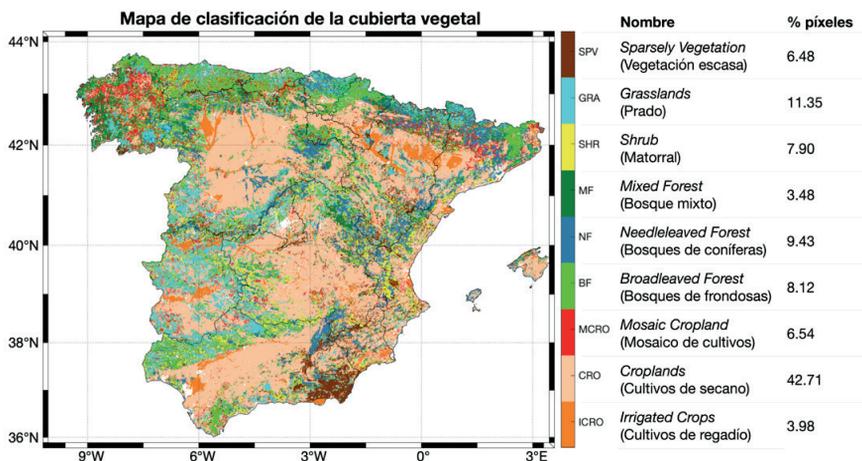


Figura A1. Clasificación de la cubierta vegetal de la Península Ibérica con las 9 clases más abundantes de vegetación (Pérez-Hoyos et al., 2012) y su extensión en porcentaje de píxeles.

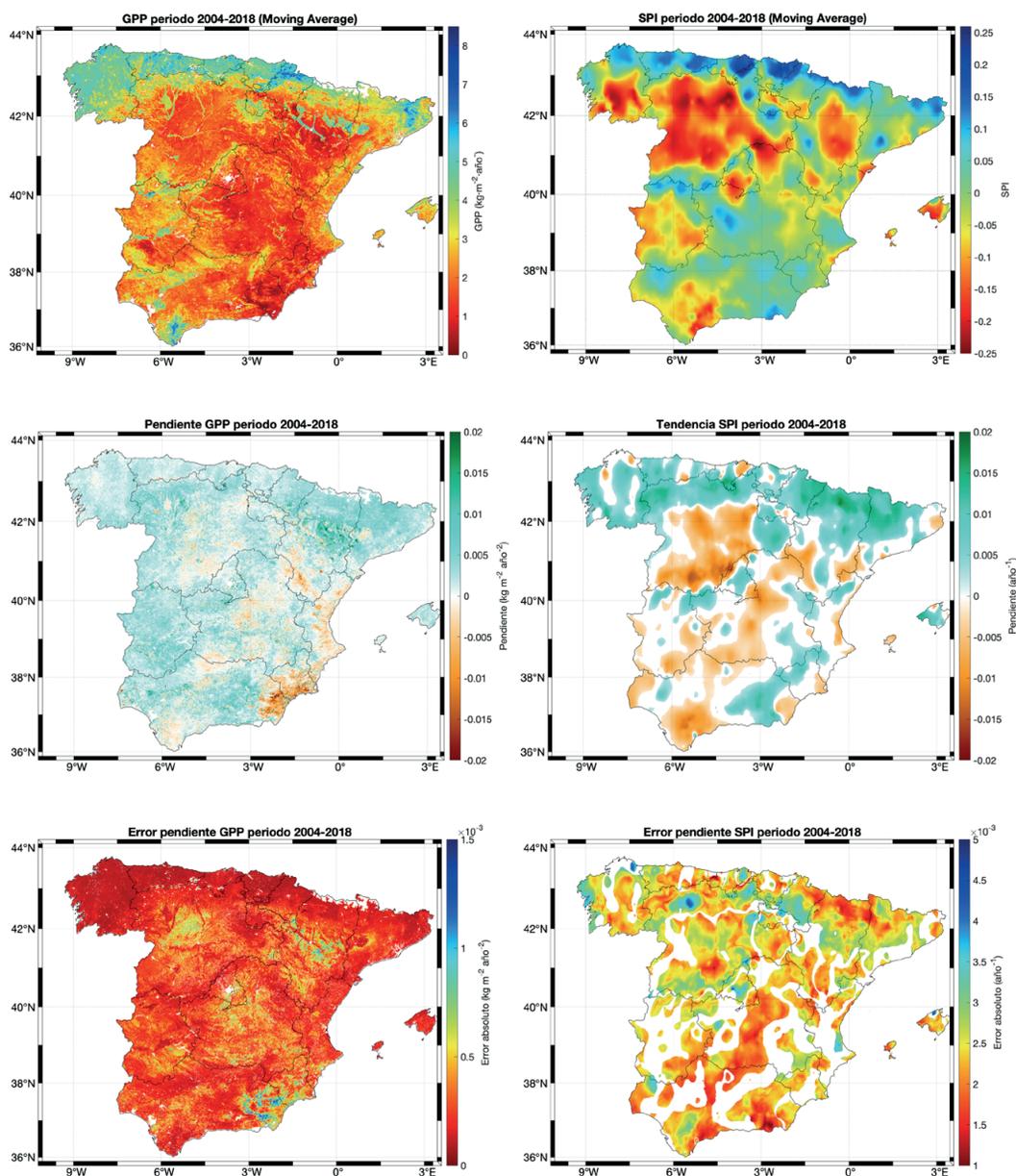


Figura A2. Imágenes de media móvil GPP y SPI para el periodo de estudio (superior) e imágenes de las pendientes (centro) con su error absoluto (inferior).

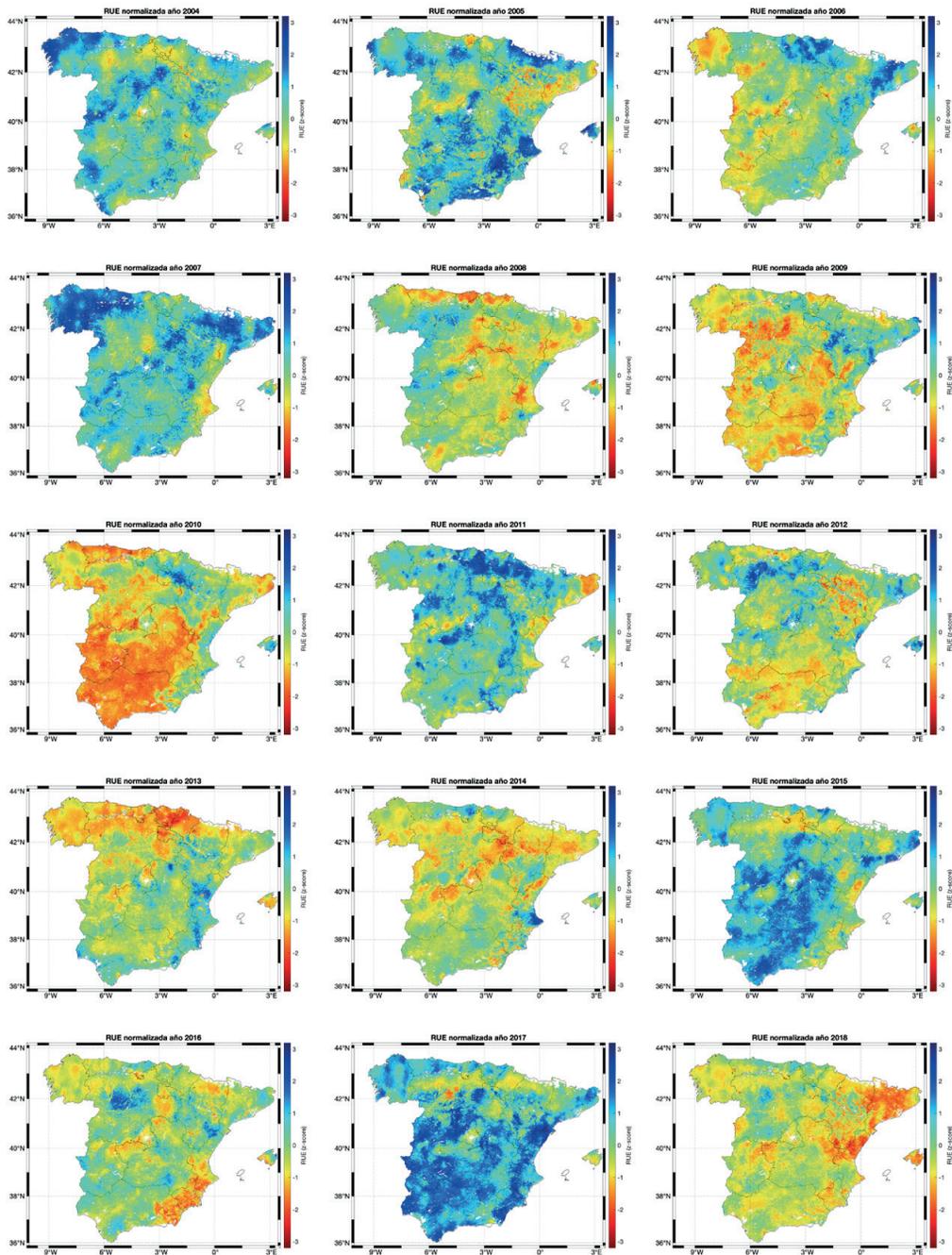


Figura A3. Imágenes de la RUE anual normalizada (*z-scores*). Los valores positivos (>0) se muestran en colores azules, y en amarillo y en rojo los negativos (<0).

Anexo II

Correlación entre GPP y PPT (Figura A4 y Tabla A2) y entre RUE y PPT (Figura A5 y Tabla A2). La correlación temporal se estudia individualmente para cada Zona a partir de sus valores anuales, obteniéndose para cada uno un coeficiente de correlación R. La correlación espacial entre GPP y PPT se estudia con los valores medios del periodo de cada Zona (puntos en forma estrellada y de color negro, Figura A4) obteniéndose así un R correspondiente.

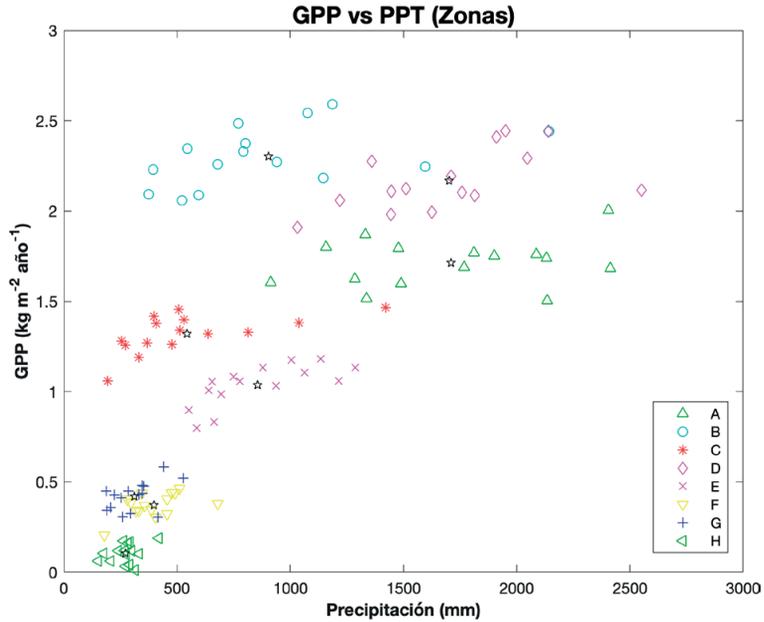


Figura A4. Valores anuales de GPP vs PPT para cada zona

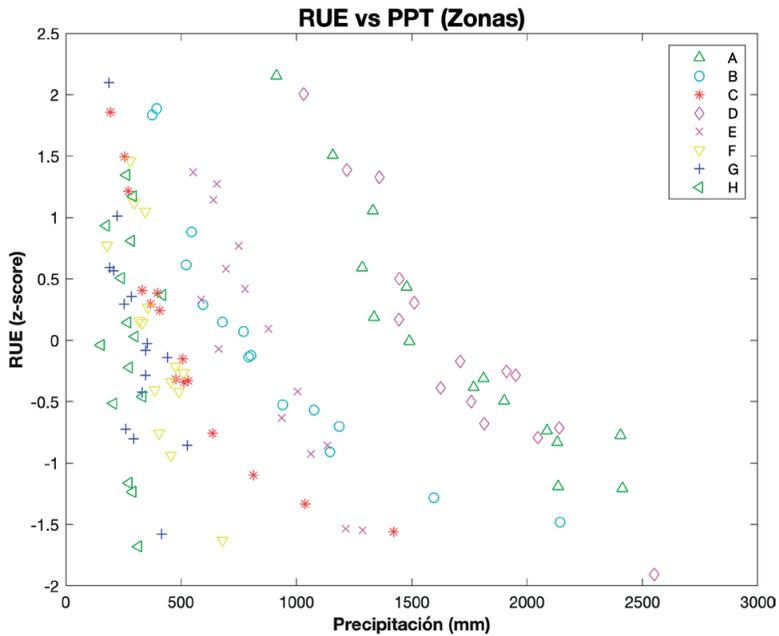


Figura A5. Valores anuales de RUE vs PPT para cada Zona.

Tabla A2. Coeficientes de correlación GPP-PPT y RUE-PPT para cada Zona.

Zona	R (GPP vs PPT)	R (RUE vs PPT)
A	0,27	-0,93
B	0,45	-0,88
C	0,60	-0,87
D	0,54	-0,94
E	0,72	-0,92
F	0,50	-0,82
G	0,50	-0,70
H	0,33	-0,15
Valores medios	0,79	