



SELECCIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HERBÁCEA EN DEHESAS

Juan Agustín Escribano Rodríguez^{1*}, Carlos Gregorio Hernández Díaz-Ambrona¹ y Ana María Tarquis Alfonso²

¹ Grupo de Sistemas Agrarios AgSystems, Departamento de Producción Agraria.

² Departamento de Matemática Aplicada.

CEIGRAM. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria s/n, E-28040 Madrid (España).

* juanagustin.escribano@upm.es

SELECTION OF VEGETATION INDICES TO ESTIMATE PASTURE PRODUCTION IN DEHESAS

Historial del artículo:

Recibido: 21/01/14

Revisado: 12/05/14

Aceptado: 08/06/15

Disponible online: 06/10/2015

Autor para correspondencia:

juanagustin.escribano@upm.es

ISSN: 2340-1672

Disponible en: <http://polired.upm.es/index.php/pastos>

Palabras clave:

Agua, NDVI, pastoreo extensivo, sequía, teledetección.

Keywords:

Drought, NDVI, rangeland grazing, water, remote sensing.

RESUMEN

La sequía en España es un fenómeno frecuente y de elevada intensidad, para ello se ha diseñado el seguro de sequía de pastos, que se basa en la evaluación de un índice de vegetación sin la estimación de la producción de biomasa del pasto. El objetivo de este trabajo es obtener funciones de producción de biomasa de los pastos mediante índices de vegetación que utilicen las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano. Para ello desde 2010 a 2013 se realizó un seguimiento del pasto herbáceo en dehesas de El Cubo de Don Sancho (Salamanca), Trujillo (Cáceres) y Pozoblanco (Córdoba). Se midió mensualmente la producción de biomasa del pasto y los índices de vegetación obtenidos del satélite DEIMOS-1 con una resolución de 22 m por 22 m. Con los datos de 2010 y 2011 se estableció la función de producción de biomasa del pasto (fresco y seco) a partir del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), del Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI), de la Proporción Modificada Simple (MSR) y del Índice de Proporción Simple (SR). Fue el NDVI el índice que mejor coeficiente de determinación mostró, 0,85 y 0,89 para pasto fresco y seco respectivamente. Los datos obtenidos en 2012 y 2013 se han utilizado para validar las funciones de producción de pasto fresco y seco. El NDVI fue el que mostró la mejor relación con la cantidad de pasto en pie tanto fresco como seco. La validación de las funciones de producción, de pasto fresco y seco, ha mostrado unos coeficientes de correlación de 0,84 y 0,67 respectivamente entre los valores observados y estimados. Estos resultados sugieren que el NDVI puede ser un buen estimador de la producción de biomasa de los pastos en dehesas.

ABSTRACT

The pasture drought insurance in Spain is based on the evaluation of a vegetation index without estimating pasture production. The aim of this paper is to obtain a pasture production function based on vegetation indexes from spectral bands of red and near infrared. From 2010 to 2013 three dehesas were followed in El Cubo de Don Sancho (Salamanca), Trujillo (Cáceres) and Pozoblanco (Córdoba) from west of Spain. Pasture production and vegetation indexes obtained from satellite DEIMOS-1 with a resolution of 22 m by 22 m were measured monthly. Data from 2010 and 2011 were used to establish a production function of pasture (fresh and dry weight) from normalized difference vegetation index (NDVI), Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI), Modified Simple Ratio (MSR) and Simple Ratio (SR). The NDVI showed the best determination coefficient: 0.85 and 0.89 for fresh and dry matter respectively, highly significant. The data obtained in 2012 and 2013 were used to validate the production function. Once again, NDVI displayed better correlation with standing pasture, both fresh and dry matter. Validation of the production function between observed and estimated values showed a correlation coefficient of 0.84 and 0.67 for fresh and dry matter. These results suggest that NDVI can be a good estimator of pasture production in dehesas.



© Juan Agustín Escribano Rodríguez

Toros en la parcela con pastoreo el 2 de junio de 2011 en una dehesa de El Cubo de Don Sancho (Salamanca).

INTRODUCCIÓN

La mayor parte del pastoreo de la península ibérica se practica bajo condiciones de secano con un suministro de agua variable y dependiente directamente de la lluvia. Según el Anuario de Estadística Agraria de 2012 en España hay 5,3 millones de hectáreas de pastizales, 3,7 millones de hectáreas de erial a pasto, 1,3 millones de hectáreas de prados, 0,2 millones de hectáreas de praderas y 4,5 millones de hectáreas de monte abierto y dehesas (MAGRAMA, 2013). La dehesa es un sistema agroforestal formado a partir del bosque mediterráneo en el que se integran la producción de pastos para la alimentación animal y la presencia de un arbolado más o menos disperso (Hernández, 1998). En el mismo sentido se refiere Ferrer *et al.* (2001): “superficie con árboles más o menos dispersos y un estrato herbáceo bien desarrollado, en la que ha sido eliminado, en gran parte, el arbustivo. Es de origen agrícola (tierras labradas en rotaciones largas) y ganadero. Su principal producción es la ganadería extensiva o semiextensiva, que suele aprovechar no solo los pastos herbáceos, sino también el ramón y los frutos del arbolado”.

La teledetección es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, superficie o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está

en contacto con él (Schowengerdt, 2007). Tiene múltiples aplicaciones en agricultura como la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación, el contenido de agua en la planta, la materia seca o la cantidad de clorofila (Cheng *et al.*, 2006). Para medir la actividad vegetativa de las plantas se utilizan índices de vegetación que son calculados a partir de la reflectividad de varias bandas del espectro. En cambio, la estimación del contenido de agua permite hacer un seguimiento de los periodos de sequía y predecir el riesgo de incendio, por lo que se utiliza para la prevención de incendios forestales. La humedad de la vegetación referida al peso seco y expresado en porcentaje se conoce como FMC (*Fine Fuel Moisture Content* o *Floor Moisture Content*), y se relaciona muy bien con medidas como el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), indicando valores altos bajo riesgo de incendios (Chuvienco *et al.*, 1999). La teledetección térmica permite la detección de estrés en las plantas mediante la relación existente entre la temperatura de la planta y su transpiración, ya que la vegetación con estrés hídrico cierra estomas y aumenta su temperatura (Gates, 1964; Jackson *et al.*, 1981; Sepulcre-Cantó *et al.*, 2005).

Los índices de vegetación más utilizados usan las bandas del infrarrojo cercano (NIR, radiación reflejada en la longitud de onda 800 nm) y el rojo (RED, radiación reflejada en la longitud

de onda 670 nm). La bibliografía nos indica los siguientes (Tabla 1): el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI), Índice de Proporción Simple (SR) y Proporción Modificada Simple (MSR).

NDVI presentó un coeficiente de correlación r^2 de 0,86 (Hill *et al.*, 2004), pero se presentan ciertas dudas ya que donde la tasa de crecimiento fue muy baja el NDVI fue alto. Así esta correlación puede dar estimaciones más bajas de la tasa de crecimiento del pasto en el momento de máximo crecimiento.

Índice	Ecuación	Referencia
1. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)	$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	$SAVI = (1 + L) \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + L)$	Huete (1988) Qi <i>et al.</i> (1994)
3. Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI)	$RDVI = (R_{800} - R_{670}) / \sqrt{R_{800} + R_{670}}$	Rougean y Breon, (1995)
4. Índice de Proporción Simple (SR)	$SR = R_{800} / R_{670}$	Jordan (1969) Rouse <i>et al.</i> (1974)
5. Proporción Modificada Simple (MSR)	$MRS = \frac{R_{800} / R_{670} - 1}{(R_{800} / R_{670} + 1)^{0.5}}$	Chen (1996)

L: factor corrector de la línea de suelo Huete (1988).

TABLA 1. Índices de Vegetación que utilizan en su cálculo solo la reflectividad en las bandas del rojo (R_{670}) e infrarrojo cercano (R_{800}).

TABLE 1. Vegetation indexes calculated with the reflectivity in the bands of red (R_{670}) and near infrared (R_{800}).

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de las bandas infrarrojo cercano (750 - 2600 nm) y rojo (630 - 700 nm). Tres bandas del espectro, la verde (520 - 530 nm), la azul (400 - 500 nm) y la roja (630 - 700 nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas (Rouse *et al.*, 1974). En contraste, la banda del infrarrojo cercano (750 - 2600 nm) es reflejada casi en su totalidad. La mayor absorción del rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es la diferencia espectral de la respuesta de la vegetación. Ninguna otra cubierta refleja de forma semejante, y por lo tanto, esta peculiaridad ha sido usada durante mucho tiempo para poder diferenciar las superficies con vegetación de las demás superficies. El intervalo de valores obtenido del NDVI varía entre menos uno (-1) y uno (+1). De ellos, sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación, los valores cercanos a cero se corresponden con zonas desprovistas de vegetación, mientras que los próximos a uno indican la mayor cantidad posible de verdor (Chuvienco, 2008). El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estado fenológico de la vegetación, situación hídrica del suelo y ambiente climático de la zona.

En zonas húmedas del País Vasco, según Aldezabal *et al.* (2010), el NDVI, tomado de los satélites SPOT 5 HRG1 y Landsat 5 Thematic Mapper, con resoluciones de 10 m x 10 m y 30 m x 30 m respectivamente, no fue un buen estimador de la biomasa aérea y no fue capaz de distinguir zonas de pastoreo frente a las no pastadas. No obstante, advierten que existe la necesidad de profundizar en dicha relación incluyendo más factores en los modelos de ajuste, principalmente los relacionados con la estructura funcional del pasto y su heterogeneidad espacio-temporal.

Varios estudios han demostrado la existencia de una buena correlación del NDVI con la producción primaria de la parte aérea de la vegetación (Paruelo *et al.*, 1997; Kerr y Ostrovsky, 2003; Alcaraz-Segura *et al.*, 2008). Sin embargo, son escasos los trabajos que los han validado con datos tomados *in situ* a una escala espacial detallada (por ejemplo, a escala de parcela experimental), ya que la obtención de datos vegetales (biomasa aérea, composición, altura, fenología, diversidad funcional) en campo incorporando el efecto del pastoreo es costoso. Además la heterogeneidad espacial dificulta y complica esta labor, y es difícil registrar largas series temporales (Aldezabal *et al.*, 2010). La comparación de la producción real y estimada a partir de una función con el

La sequía supone una anomalía transitoria, más o menos prolongada, caracterizada por un periodo de tiempo con valores de las precipitaciones inferiores a los normales en el área, siendo en España un fenómeno frecuente y de elevada intensidad. El seguro de Compensación por Pérdida de Pastos en España (línea 133 del seguro) emplea un índice para determinar la cobertura del mismo, al objeto de solucionar los problemas de peritación que se originan para determinar la cantidad de pasto afectado por la sequía, cuando existen variaciones del tipo de suelo, de composición específica de pasto, de carga ganadera y de tipo de ganado. Es un seguro que cubre a las explotaciones de ganado bovino reproductor y de lidia, ovino y caprino reproductor y al equino en extensivo. El índice que utiliza el seguro se basa en la medición por satélite del NDVI (sensor MODIS instalado en el satélite Terra) sobre un pixel de tamaño 250 x 250 metros, obteniéndose el valor medio decenal de una comarca homogénea que conforman varios pixeles. Se mide exclusivamente en parcelas de pasto herbáceo natural o cultivado, y en ausencia de vegetación leñosa como arbolado o matorral. La sequía no se estima directamente sino por comparación con la media de los diez años anteriores. Este seguro es el principal instrumento financiero con el que cuentan los ganaderos para hacer frente al gasto que supone el suplemento de alimentación del ganado debido a la sequía (Báez, 2012). Por tanto, los encargados de

efectuar las mediciones del índice deben utilizar información oportuna que esté disponible y sea fiable (Bielza *et al.*, 2009). Para el diseño de un adecuado producto de seguro indexado se requieren datos históricos suficientes y un buen modelo que permita predecir la probabilidad de varias medidas del índice. Es por ello que normalmente se utilizan satélites que cuentan con un histórico de datos suficiente. Para utilizar otros que no tengan series amplias de datos será preciso la validación en campo de los datos obtenidos por teledetección. El diseño del contrato de seguro de sequía en España, desde su implementación en 2001, ha sufrido variaciones en sus condiciones, producto de las mejoras introducidas con el objeto de dar respuesta a las necesidades de este tipo de coberturas (Agroseguro, 2005). Los principales ajustes se han realizado sobre los periodos de garantías, en la valoración de las pérdidas y en las zonas homogéneas de medida (Tabla 2).



© Carlos Gregorio Hernández Díaz-Ambrosia

Muestreo del pasto herbáceo el 11 de mayo de 2011 en la parcela no pastoreada en una dehesa de Pozoblanco (Córdoba).

Los datos sobre las pólizas totales del seguro español en sequía en pastos muestran un periodo inicial de implantación del seguro, desde el año 2001-2004, y un periodo de estabilización de la contratación entre el periodo 2005-2011. Ha de remarcarse la elevada contratación en el año 2005 debido a la certeza de la sequía que se produjo ese mismo año en el que el periodo de contratación del seguro se extendió al mes de marzo cuando ya se estaba produciendo la sequía, por lo que se puede calificar de año anómalo (Tabla 3). La siniestralidad en los años 2005, 2009 y 2012 alcanzó respectivamente

65,06 millones de euros, 19,85 millones de euros y 42,63 millones de euros (Agroseguro, 2013). Las zonas con más contratación son Extremadura y Andalucía que suman más del 90% de bovino, equino, ovino y caprino. Por otra parte, la contratación ha estado siempre muy condicionada a las primas de la administración, que han llegado a subvencionar la mitad del coste de aseguramiento y a la percepción de los

Elemento	Año	Ajustes a las condiciones
Clases de explotación	2002	Se incluye el equino a las clases de explotación ya existentes (bovino reproductor, ovino y caprino reproductor)
Definición de pastos	2003	Se incluyen barbechos y rastros
Zonificación	2004	Se clasifican las zonas homogéneas de pastoreo según aprovechamiento de pastizales o barbechos
Ámbito de aplicación	2005	Se redefinen las zonas homogéneas
Precio de suplemento de alimentación	2005	Se flexibiliza, permitiendo al asegurado su elección dentro de precios límites establecidos por el Ministerio de Agricultura
Estrato de garantía	2007	Se modifican a dos estratos de garantía: sequía leve (A) y sequía extrema (B). Se modifica la desviación típica y sus coeficientes, en ambos estratos se obtienen de deducir al NDVI Medio un 0,7 y un 1,5 de su desviación típica por zona correspondiente
Opciones de cobertura	2008	Se reducen a dos opciones de cobertura. La opción A (NDVI es inferior al garantizado en más de tres decenas) y la opción B, (la siniestralidad en las decenas supere el 10% del capital asegurado)
Periodo de garantía	2008	Se especifica en función del estrato de garantía y de las zonas homogéneas
Momento de pago de indemnización	2008	Se establecen dos momentos de pago a lo largo del periodo de garantías
Periodo de suscripción	2009	Se modificó en función de los periodos de garantía y de los grupos de comarcas
Índice de Vegetación (NDVI) Medio	2009	Se modifica la serie histórica utilizada para su cálculo, pasando de imágenes de NOAA (1 km) a MODIS (0,25 km) para el periodo 2000 al 2009
Máximo Valor Compuesto Decimal	2010	Se modifica el periodo de suscripción del seguro y se introduce el concepto de Máximo Valor Compuesto Decimal (MVD)
Indemnización y aprovechamiento	2011	Se modifican los porcentajes de indemnización para el grupo Cantábrico y diferenciación de diez municipios en la comarca Bajo Aragón del resto de municipios (Cambio de aprovechamiento tipo pastizal por aprovechamiento tipo barbecho)
Opciones de aseguramiento	2012	Se permite en determinadas comarcas cubrir la otoñada con inicio de garantías el 10 de octubre.
Estratos de garantías	2012	Se modifican las definiciones correspondientes a los dos estratos de garantías: - Estrato 1. Índice de Vegetación Garantizado (NDVI-G) de cada decena, calculado para cada zona homogénea de pastoreo, menos 0,7 veces la desviación típica del mismo, para cada decena. - Estrato 2. Índice de Vegetación Garantizado (NDVI-G) de cada decena, calculado para cada zona homogénea de pastoreo
Denominación de la línea asegurada	2013	Se modifica la denominación de la actual línea de «seguro de sequía en pastos» que pasa a denominarse «seguro de compensación por pérdida de pastos»
Periodo de garantía e indemnización	2013	Modificación de los periodos de garantía y porcentajes de indemnización
Nuevo grupo de comarcas	2013	Separación de las comarcas de la Comunidad Autónoma de Islas Baleares de las comarcas de Andalucía: se crea un nuevo grupo (Grupo 7)
Nuevas opciones de aseguramiento	2013	Ampliación de las opciones de aseguramiento que presentan diferente periodo de garantía, siniestro mínimo indemnizable y, en su caso franquicia de daños (Opciones A, B, C D y E)

Fuente: Ampliado de Báez, 2012.

TABLA 2. Principales ajustes técnicos al contrato de seguro de sequía en pastos.

TABLE 1. Principal technical settings of the pastures drought insurance in Spain.

Año	Pólizas	Animales	Animales por pólizas	Capital asegurado por póliza	Prima por animal asegurado	Subvención por animal asegurado	Capital asegurado por animal
2001	63	11 282	179,1	40 032,9	16,6	6,3	223,5
2002	54	11 119	205,9	41 689,2	15,2	6,4	202,5
2003	42	7 674	182,7	40 246,4	13,0	5,7	220,2
2004	4 202	1 518 244	361,3	49 682,6	5,1	1,6	137,5
2005	20 876	6 529 413	312,8	22 186,9	4,4	1,6	70,9
2006	6 725	2 185 140	324,9	22 979,9	4,5	2,0	70,7
2007	5 135	1 887 874	367,6	25 564,1	6,9	2,7	69,5
2008	3 024	1 089 503	360,3	22 288,7	6,9	2,9	61,9
2009	5 575	2 005 805	359,8	25 277,4	7,6	2,6	70,3
2010	4 660	1 615 402	346,6	23 463,9	7,4	2,7	67,9
2011	4 093	1 420 018	346,9	23 300,1	6,9	2,6	67,2
2012	5 670	1 949 000	343,7	19 153,4	7,4	2,6	68,1
2013*	5 330	1 539 203	288,8			Sin datos disponibles	

* Datos provisionales. Fuente: Agroseguro (2013).

TABLA 3. Evolución de la contratación del seguro de sequía en pastos en España.

TABLE 3. Hiring evolution of the pasture drought insurance in Spain.

ganaderos, que han dejado de contratar cuando el seguro ha mostrado fallos.

el municipio de Trujillo, en una zona adehesada, sin presencia de arbolado en ninguna de las dos parcelas de seguimiento y pastoreadas por ganado. Las parcelas de seguimiento en Córdoba se ubicaron en una dehesa de Pozoblanco, con escasa cobertura de encinas y pastada por vacuno y ovino (Figura 1).

El objetivo de este trabajo es evaluar la posibilidad de estimar la producción de biomasa de los pastos herbáceos en dehesa mediante distintos índices de vegetación obtenidos del satélite DEIMOS-1. Conocida la producción real de los pastos herbáceos, el seguro de sequía en pastos podría calcular las indemnizaciones en función de la cantidad de producción asegurada.

Conforme a la resolución espacial del satélite DEIMOS-I, se establecen dos parcelas elementales de seguimiento en cada una de las zonas, de 66 m × 66 m (cada una incluye nueve píxeles del satélite DEIMOS-1, con una subparcela central de 22 m de lado y ocho contiguas para eliminar el efecto borde). Una vallada, para evitar el pastoreo, y la otra con pastoreo, como una forma de tener pasto con diferentes tipos de estructura y de respuesta al índice de vegetación. Ambas se encuentran exentas de arbolado para facilitar el seguimiento satelital y en concordancia con las zonas homogéneas que utiliza el seguro de compensación por pérdida de pastos, que mide en zonas sin arbolado. El ensayo comenzó en mayo de 2010 y terminó en junio de 2013 (Tabla 5).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se ha llevado a cabo en tres zonas de dehesa del suroeste de la península Ibérica (Tabla 4), pertenecientes a los tipos climáticos III, II y I definidos por Sánchez de Ron *et al.* (2007), y localizadas en los municipios El Cubo de Don Sancho (Salamanca), Trujillo (Cáceres) y Pozoblanco (Córdoba) respectivamente. En Salamanca se estableció el ensayo en la Dehesa Boyal de El Cubo de Don Sancho, ocupando una zona adehesada con baja densidad de árboles y pastado con ganado vacuno de lidia. En Cáceres las parcelas se situaron en

Para cada fecha de muestreo (Tabla 5) se determinó la biomasa total de la parte aérea en peso fresco (MF: materia fresca), mediante el promedio de tres muestras al azar en el píxel central, con

Provincia	Salamanca	Cáceres	Córdoba
Comarca	Vitigudino	Trujillo	Pedroches
Altitud (msnm)	756	564	579
Temperatura media anual (°C)	12,4	15	15
Precipitación media anual (mm)	480	504	482
Evapotranspiración media anual (mm)	1 018	1 267	1 234
Litología	Granito	Pizarra	Granito
Tipo de suelo	<i>Dystric cambisol</i>	<i>Eutric cambisol</i>	<i>Dystric cambisol</i>
Textura	Franco Arenosa	Franca	Franco Arcillo Arenosa
Materia orgánica (%)	2,2	3,0	2,5
pH	4,9	5,4	5,7
Profundidad suelo (m)	1,20	0,60	0,80
Vegetación	Encinas y robles con pastos anuales subnitrófilos	Encinas con pastos anuales subnitrófilos con cantuesos y otros matorrales	Encinas con pastos anuales subnitrófilos con retama
Estación meteorológica SIAR	Ciudad Rodrigo	Valdesalor	Hinojosa del Duque

SIAR: Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR, 2013).

TABLA 4. Características topográficas, climáticas, y edáficas de las dehesas estudiadas.

TABLE 4. Topography, climate, and soil characteristics of the studied dehesas.

Año	Mes	Salamanca (Vitigudino)	Cáceres (Trujillo)	Córdoba (Pozoblanco)	
2010	Mayo		14		
	Junio		1	22	
	Julio	1	9	22	
	Agosto	5	9		
	Septiembre	15	23	8	
	Octubre	11		21	
2011	Noviembre	9	25		
	Marzo		21	16	
	Abril	1	18	11	
	Mayo	3	25	11	
	Junio	2 y 29	21	8	
	Julio	26			
	Septiembre	26	15	7	
	Octubre			25	
	Noviembre	14	7	25	
	Diciembre	7	5		
	2012	Mayo	11	11	24
		Junio	29		19
Julio				18	
Septiembre		19			
Octubre		24		9	
Noviembre				28	
Diciembre		3			
2013		Enero			29
	Febrero	1			
	Marzo	19		20	
Número visitas		20	14	18	

TABLA 5. Fechas de salidas al campo para la toma de datos.

TABLE 5. Dates of field trips for data collection.

cuadrados segados de 0,5 m por 0,5 m. Las muestras se mantuvieron en bolsas de plástico con cierre hermético, conservadas en oscuridad e introducidas en una cámara refrigerada especialmente diseñada para transporte de muestras vegetales, hasta su peso en laboratorio en balanza de precisión ($\pm 0,01$ g). El peso seco se determinó secando las muestras en estufa a 75 °C durante 48 horas hasta alcanzar peso constante (MS: Materia seca). El muestreo de campo se hizo el día siguiente al de la toma de la imagen, tomando para cada pixel los valores del: Infrarrojo cercano (NIR, radiación reflejada en la longitud de onda 800 nm), rojo (RED, radiación reflejada en la longitud de onda 670 nm) y verde (GREEN, radiación reflejada en la longitud de onda 550 nm). Con esos valores se determinaron los índices de vegetación: Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI), Índice de Proporción Simple (SR) y Proporción Modificada Simple (MSR) (Tabla 1).

Funciones de producción entre los índices de vegetación y el pasto herbáceo

Para obtener las funciones de producción se consideró el método de estimación de la regresión ponderada, ya que este procedimiento da una mayor ponderación a las observaciones que presentan menos variabilidad (Carroll y Ruppert, 1988). Se aplicó una regresión ponderada entre la variable X (índice de vegetación) y la variable Y (para cada uno de los casos: materia fresca, materia seca o porcentaje de pasto seco sobre fresco). En nuestro caso, no hay ninguna medición repetida para cada

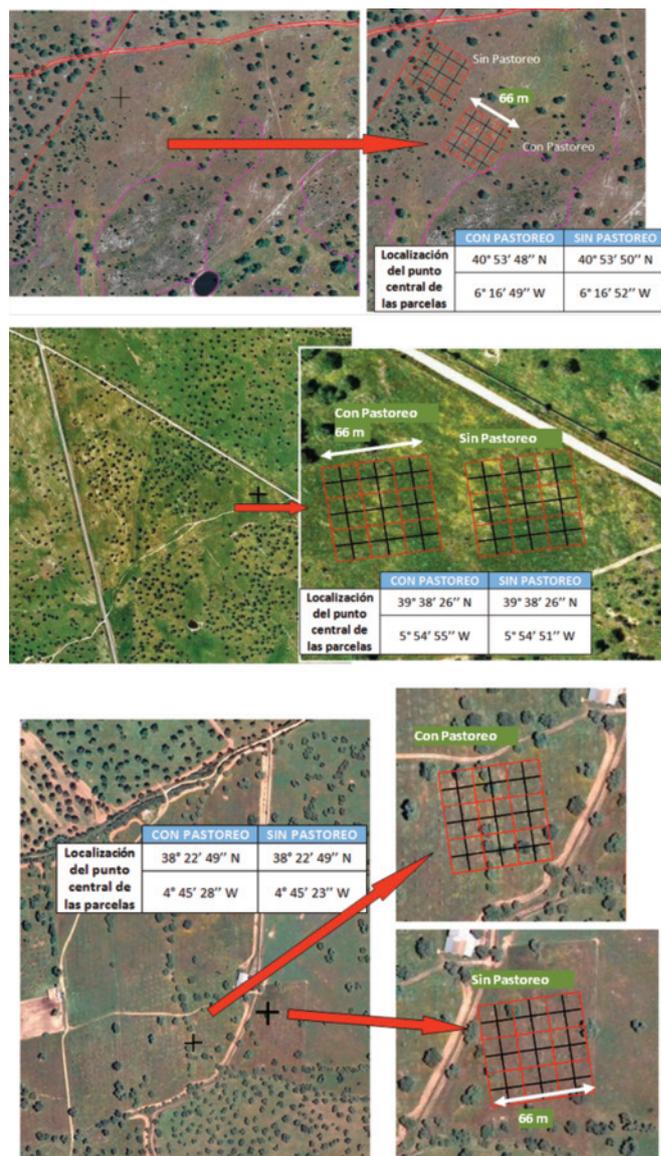


FIGURA 1. Vista y localización de las parcelas de seguimiento de Salamanca, Cáceres y Córdoba sobre las ortofotos del SIGPAC.

FIGURE 1. View and location of monitoring plots of Salamanca, Cáceres, and Córdoba on SIGPAC orthophotos.

combinación de valores de las variables estudiadas. Por ello, para aplicar el método de regresión ponderada se establecen grupos de replicación aproximados para poder estimar los pesos que se deben aplicar a cada punto, dividiendo los datos en intervalos constantes del índice de vegetación (variable X). Después se calculó la media y la varianza del conjunto de valores de la variable Y incluidas en cada una de las clases en las que ha quedado dividida la variable X.

Al final se compararon las parcelas de la variable X frente a las variables Y para confirmar que los conjuntos aproximados de mediciones repetidas eran razonables (Ryan, 1997). Con los datos de 2010 y 2011 se establecieron los valores de las funciones de regresión para los pares de valores medios. Al tomar intervalos equidistantes y que cada punto es

la media de tres medidas al azar, el sesgo en el análisis estadístico es despreciable.

Del conjunto de datos se eliminaron aquellos que no se consideraron válidos. Los datos no válidos fueron los que para un valor del índice de vegetación su correspondiente cantidad de pasto en pie era cero, o aquellos que habiendo medido la cantidad de pasto en pie no tenían el correspondiente valor del índice de vegetación, debido principalmente a la presencia de nubes en la imagen satelital. Así, con los datos de cada intervalo, se ha estimado el valor medio de cada índice y el valor medio de pasto fresco con el fin de eliminar los posibles errores accidentales y eliminar la dispersión.

El procedimiento también se aplicó para relacionar los índices de vegetación con la cantidad de pasto en materia seca (pasto seco), pero no se encontró relación significativa. Así, el coeficiente de regresión lineal r^2 fue en todos los casos inferior a 0,2 por lo que no se muestran estos resultados. Se ha estimado la cantidad de pasto en materia seca a partir del porcentaje de materia seca sobre materia fresca del pasto y de los índices de vegetación. Una vez obtenida la función del pasto fresco a partir de cada índice de vegetación se ajustó una función con el porcentaje de pasto seco sobre el pasto fresco.

Se realizó un análisis de frecuencia en peso fresco con intervalos de 500 kg/ha, calculándose para cada clase los valores medios de las variables: índices de vegetación y porcentaje de pasto seco sobre fresco.

Validación de las funciones de producción

Se han calculado los índices de calidad del modelo (Tabla 6) para ver la eficiencia de las funciones de producción pasto fresco y seco (Fila *et al.*, 2001). Los datos observados durante el periodo 2012 y 2013 se utilizaron para validar las funciones de producción (valores estimados) de pasto fresco y pasto seco que se obtienen a partir del valor de los índices de vegetación observados.

Índice	Ecuación	Rango	Valor óptimo
Error de desviación medio (MBE)	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)}{n}$	$[-\infty, +\infty]$	0
Error cuadrático medio (RMSE o CME)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{n}}$	$[0, +\infty]$	0
Error cuadrático de la media relativo (RRMSE)	$RRMSE = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{O}}$	$[0, +\infty]$	0
Coficiente residual de masa (CRM)	$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Oi - \sum_{i=1}^n Ei}{\sum_{i=1}^n Oi}$	$[-\infty, 1]$	0
Eficiencia del modelo (EF)	$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2}$	$[0, 1]$	1

Siendo, Ei: valor estimado con la función de producción, Oi: valor observado, \bar{O} : valor medio observado.

TABLA 6. Índices de calidad aplicados a las funciones de producción.

TABLE 6. Quality indexes applied to the production functions.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento meteorológico

El seguimiento meteorológico de los tres años de estudio mostró una distribución irregular de las precipitaciones, observándose periodos continuados de más de 50 días sin ninguna precipitación (Tabla 7).

En Salamanca la precipitación media anual de los últimos diez años fue 480 mm, mientras que en el año agrícola 2010-2011 se registraron 514 mm, en 2011-2012 346 mm y en 2012-2013 665 mm. La temperatura media anual de los últimos diez años fue 12,5 °C (Tabla 7), mientras que los años agrícolas 2010-2011 y 2012-2013 fueron ligeramente más cálidos, aunque la temperatura media de máximas fue mayor en el año agrícola 2011-2012. Contrariamente la temperatura media de mínimas fue menor en el año agrícola 2011-2012. El periodo seco medio estacional va desde el mes de junio hasta el mes de septiembre, en el que las precipitaciones apenas suponen el 10% de la lluvia media anual.

En Cáceres, Trujillo, la precipitación media anual de los últimos diez años fue 504 mm, distribuidos entre el otoño y la primavera. En el año agrícola 2010-2011 se registraron 574 mm, en 2011-2012 330 mm y en 2012-2013 696 mm (Tabla 7). La temperatura media anual de los últimos diez años fue 15 °C, mientras que los años agrícolas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013 fueron ligeramente más cálidos, aunque la temperatura media de máximas fue mayor en el año agrícola 2012-2013. La temperatura media de mínimas fue menor en el año agrícola 2011-2012.

En Córdoba, Pozoblanco, el clima es el típico del mediterráneo con una precipitación media anual de 482 mm, distribuidos entre el otoño y la primavera. En el año agrícola 2010-2011 se registraron 574 mm, mientras que en 2011-2012 312 mm y en 2012-2013 551 mm (Tabla 7). La temperatura media anual de los últimos diez años fue de 15 °C, mientras que los años agrícolas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013 fueron ligeramente más fríos, aunque la temperatura media de máximas fue mayor en el año agrícola 2011-2012. A pesar de esto, la temperatura media de mínimas fue menor en el año agrícola 2011-2012.

En los últimos diez años los periodos máximos de días consecutivos sin lluvia se producen durante el verano en las tres zonas estudiadas. En Salamanca, el periodo máximo de días consecutivos sin lluvias fue de 58 días entre junio y agosto de 2004, superior en ocho días a los medidos en una zona próxima por Martínez Fernández *et al.* (2001). Estos valores aumentan conforme nos desplazamos al sur. En Cáceres aumentó hasta los 72 días comprendidos entre junio y agosto de 2012 y en Córdoba el número de días consecutivos sin lluvia fue de 82 días, de junio a septiembre de 2009.

Variable	Periodo	Salamanca (Vitigudino)	Cáceres (Trujillo)	Córdoba (Pozoblanco)
Precipitación (mm)	2010-2011	514	575	574
	2011-2012	346	330	312
	2012-2013	665	696	551
	Media 10 años	480	504	482
Temperatura media (°C)	2010-2011	12,7	15,5	15,2
	2011-2012	12,1	15,2	14,9
	2012-2013	12,6	15,2	14,6
	Media 10 años	12,5	15,1	15,2
Temperatura media de máximas (°C)	2010-2011	19,7	21,9	21,9
	2011-2012	19,8	22,5	22,6
	2012-2013	19,2	21,1	21,1
	Media 10 años	19,6	21,1	22,1
Temperatura media de mínimas (°C)	2010-2011	5,9	9,0	8,1
	2011-2012	4,8	8,0	6,8
	2012-2013	6,0	8,8	7,7
	Media 10 años	5,5	8,0	8,0

TABLA 7. Precipitación y temperaturas medias para los años agrícolas de 2010 a 2013 comparados con la media de los diez últimos años.

TABLE 7. Precipitation and temperature averages for growing seasons from 2010 to 2013 compared with the ten years average.

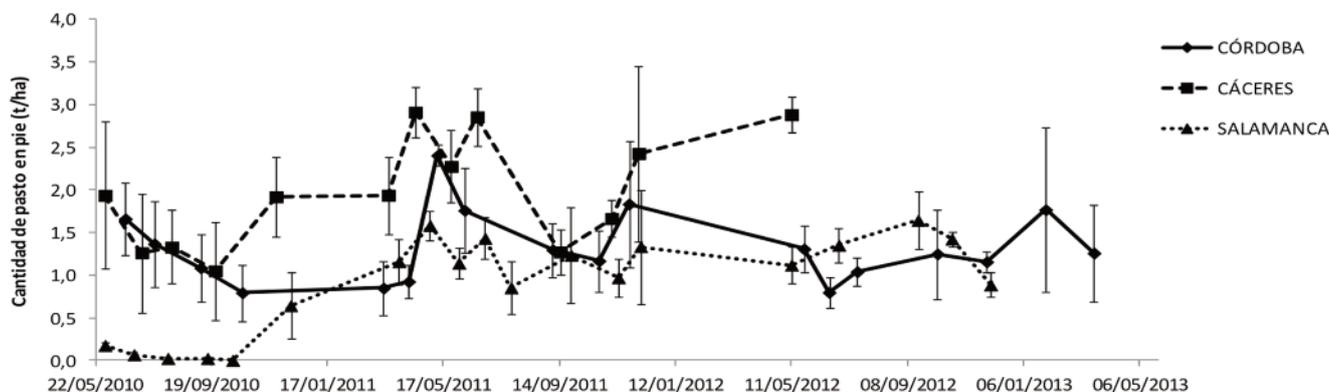


FIGURA 2. Evolución del pasto herbáceo en pie en parcelas no pastadas (materia seca) para las tres áreas de estudio durante 2010 y 2013.

FIGURE 2. Evolution of pasture in ungrazed paddocks (dry matter) for the three locations during 2010-2013.

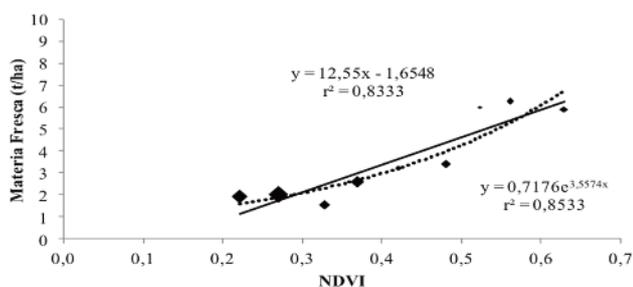


FIGURA 3. Relación entre el NDVI y la materia fresca (MF, t/ha) del pasto herbáceo en pie para las tres zonas obtenida entre 2010 y 2011. Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.

FIGURE 3. Relationship between NDVI and fresh matter (MF, t/ha) of standing grass for the three zones, obtained between 2010 and 2011. Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

Producción de pasto herbáceo

En Salamanca la cantidad de pasto en pie máxima en materia seca alcanzada por la vegetación herbácea fue de 1,64 t/ha en octubre de 2012 (Figura 2), mientras que la cantidad mínima registrada fue de 0,02 t/ha en septiembre de 2010. En Cáceres,

fue de 2,90 t/ha en abril de 2011, y de 1,00 t/ha en septiembre de 2010, respectivamente. En Córdoba, fue de 2,40 t/ha en mayo de 2011, y 0,80 t/ha en junio de 2012, respectivamente.

De las tres zonas estudiadas, la más productiva fue la de Cáceres, seguida por Córdoba y Salamanca. Las máximas producciones se han obtenido durante la primavera, mientras que en verano disminuye a valores mínimos. La producción otoñal se encuentra muy relacionada con las precipitaciones registradas al inicio del otoño, ya que si estas son bajas o se retrasan, el crecimiento de pasto se reduce considerablemente.

Funciones de producción para estimar la cantidad de materia fresca del pasto herbáceo

El modelo de regresión ponderada simple se ha generado con los datos de producción del estrato herbáceo y sus respectivos valores de NDVI. Considerando un intervalo de valores de NDVI de 0,05 en 0,05 se estimó el valor medio del NDVI y del pasto fresco. La función de ajuste exponencial presentó

un coeficiente de determinación mayor que la función lineal (Figura 3).

Para analizar la relación entre la cantidad de pasto fresco y el RDVI se realizó un análisis de frecuencia en intervalos de valores de RDVI de 0,05 en 0,05 y se estimó el valor medio del RDVI y del pasto fresco, y el número de muestras para cada intervalo. La función de ajuste exponencial presentó un coeficiente de determinación mayor que en la función lineal (Figura 4), pero en ambos casos inferiores a los obtenidos cuando se utilizó el NDVI.

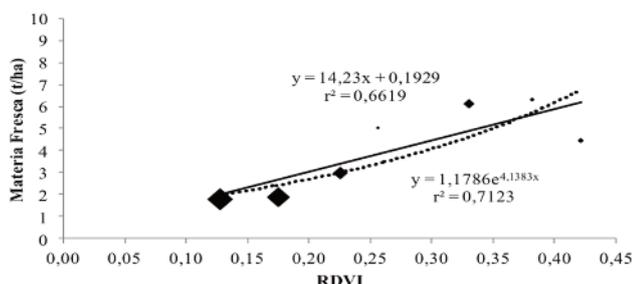


FIGURA 4. Relación entre el RDVI y materia fresca (MF, t/ha) del pasto herbáceo en pie para las tres zonas obtenida entre 2010 y 2011. Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.

FIGURE 4. Relationship between RDVI and fresh matter (MF, t/ha) of standing grass for the three zones, obtained between 2010 and 2011. Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

Para ver la relación entre la cantidad de pasto fresco y el SR se realizó un modelo de regresión simple que se ha generado con los datos de producción de pasto herbáceo y sus respectivos valores de SR, de los dos años. Se realizó un análisis de frecuencia en intervalo de valores de SR de 0,5 en 0,5 y se estimó el valor medio del SR, del pasto fresco y

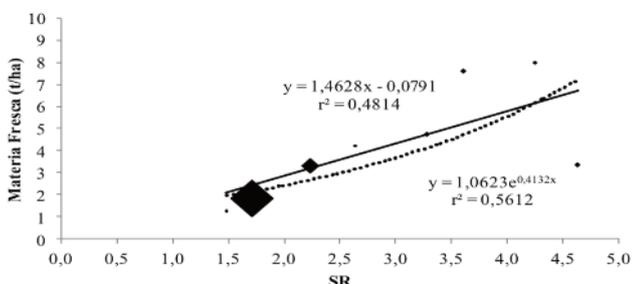


FIGURA 5. Relación entre el SR y materia fresca (MF, t/ha) del pasto herbáceo en pie para las tres zonas obtenida entre 2010 y 2011. Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.

FIGURE 5. Relationship between SR and fresh matter (MF, t/ha) of standing grass for the three zones, obtained between 2010 and 2011. Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

el número de muestras para cada intervalo. La función de ajuste exponencial presentó un coeficiente de determinación mayor que en la función lineal (Figura 5), con relaciones aún más bajas que cuando se utilizan los índices de vegetación NDVI y RDVI. En este caso la mayoría de los valores de materia fresca se concentran en los valores más bajos del índice de relación simple.

El análisis de la relación entre la cantidad de pasto fresco y el MSR se realizó mediante un análisis de frecuencia en intervalos de valores de MSR de 0,2 en 0,2 y se estimó el valor medio del MSR y del pasto fresco y el número de muestras para cada intervalo.

La función de ajuste exponencial presentó un coeficiente de determinación mayor que la función lineal (Figura 6), pero estas relaciones fueron las peores de los cuatro índices analizados.

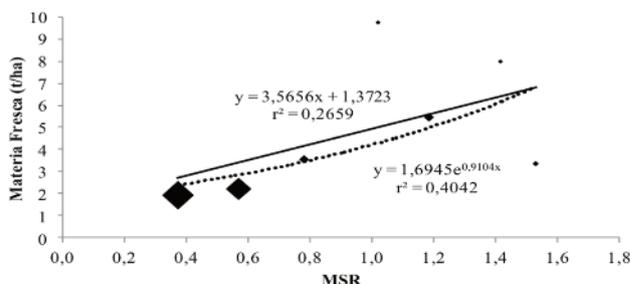


FIGURA 6. Relación entre el MSR y materia fresca (MF, t/ha) del pasto herbáceo en pie para las tres zonas obtenida entre 2010 y 2011. Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.

FIGURE 6. Relationship between MSR and fresh matter (MF, t/ha) of standing grass for the three zones, obtained between 2010 and 2011. Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

El índice que mostró una mejor correlación fue el NDVI en la estimación del pasto herbáceo fresco a partir de los datos satelitales (Tabla 8), ya que muestra un coeficiente de determinación (r^2) de 0,85 altamente significativo ($P < 0,05$).

Índice	Función	Coefficiente de Correlación r^2
1. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)	$0,7176 e^{3,5574 \times \text{NDVI}}$	0,8533
2. Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI)	$1,1786 e^{4,1383 \times \text{RDVI}}$	0,7123
3. Índice de Proporción Simple (SR)	$1,0623 e^{0,4132 \times \text{SR}}$	0,5612
4. Proporción Modificada Simple (MSR)	$1,6945 e^{0,9104 \times \text{MSR}}$	0,4042

TABLA 8. Funciones de producción de pasto fresco y coeficientes de correlación de los Índices de Vegetación utilizados.

TABLE 8. Production functions of fresh grass and correlation coefficients used in the Vegetation Indexes.

Por lo tanto la función de producción propuesta obedece a una ecuación exponencial del pasto fresco a partir del NDVI, definida para los valores del índice entre 0,20 y 0,68, respectivamente según suelo desnudo y máxima actividad vegetativa.

Funciones de producción para estimar la cantidad de materia seca del pasto herbáceo

La función de ajuste del porcentaje de materia seca con la materia fresca del pasto herbáceo frente a los valores correspondientes de NDVI (Figura 7) presentó un coeficiente de determinación (0,89) mayor para la función exponencial que en la función lineal (0,86), siendo altamente significativa ($P < 0,05$).

Se realizó un ajuste, tanto lineal como exponencial, con los datos de porcentaje de pasto seco sobre pasto fresco, frente a los valores correspondientes de RDVI (Figura 8), siendo el exponencial el que tiene mejor coeficiente de determinación (0,72), aunque inferior al obtenido cuando se emplea el NDVI.

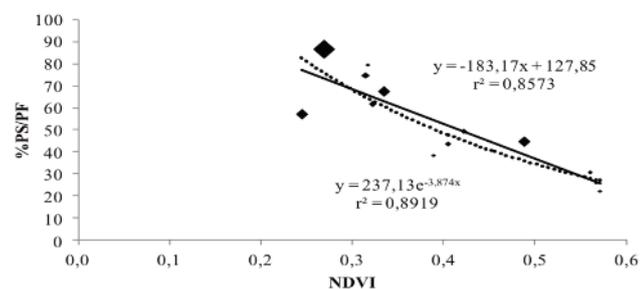


FIGURA 7. Relación entre el NDVI y el porcentaje de pasto seco frente al pasto fresco (%PS/PF). Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras
FIGURE 7. Relationship between NDVI and percentage of pasture dry matter against the fresh matter (% PS/PF). Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

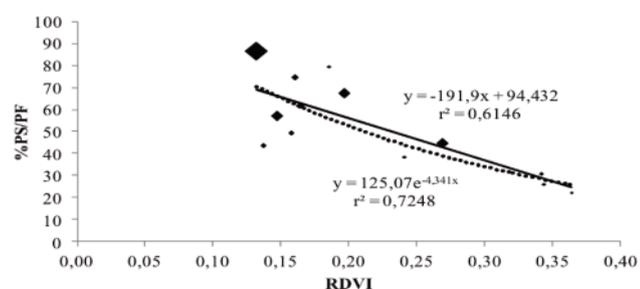


FIGURA 8. Relación entre el RDVI y el porcentaje de pasto seco frente al pasto fresco (%PS/PF). Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.
FIGURE 8. Relationship between RDVI and percentage of pasture dry matter against the fresh matter (% PS/PF). Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

Se realizó un ajuste, tanto lineal como exponencial, con los datos de porcentaje de pasto seco sobre pasto fresco, frente a los valores correspondientes de SR (Figura 9), siendo el exponencial el que tiene mejor coeficiente de ajuste (0,66).

Para el índice de vegetación MSR la función exponencial presentó un mejor coeficiente de determinación (0,73) que la lineal para la estimación de la relación materia seca sobre materia fresca del pasto herbáceo (Figura 10).

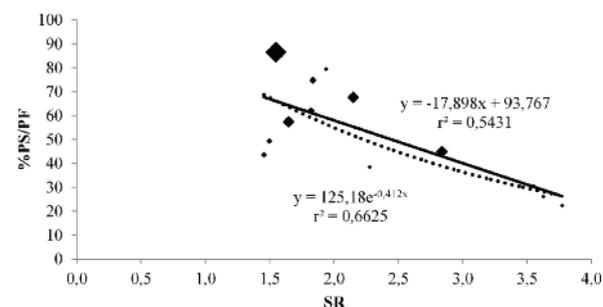


FIGURA 9. Relación entre el SR y el porcentaje de pasto seco frente al pasto fresco (%PS/PF). Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.
FIGURE 9. Relationship between SR and percentage of pasture dry matter against the fresh matter (% PS/PF). Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

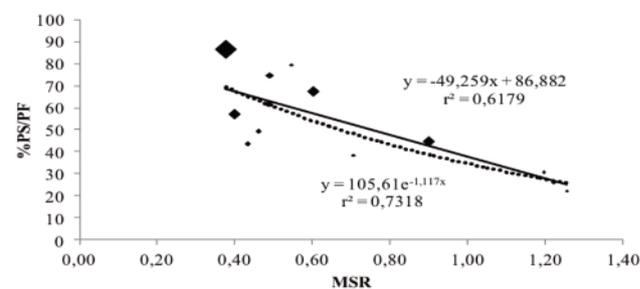


FIGURA 10. Relación entre el MSR y el porcentaje de pasto seco frente al pasto fresco (%PS/PF). Línea continua ajuste lineal y línea de puntos ajuste exponencial. El tamaño del punto es proporcional al número de muestras.
FIGURE 10. Relationship between MSR and percentage of pasture dry matter against the fresh matter (% PS/PF). Solid line linear fit and dotted line exponential fit. Dot size is correlated with the sample size.

Para la estimación de la relación porcentual entre pasto seco y pasto fresco, el índice que mostró una mejor correlación fue el NDVI (Tabla 9), ya que muestra el mayor coeficiente de determinación (0,89) altamente significativo ($P < 0,05$), definida para los valores entre 0,27 y 0,57 del índice NDVI, según los datos obtenidos en campo suelo desnudo y máxima actividad vegetativa respectivamente.

Para la obtención de una función para la estimación de la cantidad de pasto seco a partir del dato del NDVI se han evaluado

Índice	Función de producción	Coefficiente de Correlación r^2
1. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)	$237,13 e^{-3,874 \times NDVI}$	0,8919
2. Índice de Vegetación Renormalizado (RDVI)	$125,07 e^{-4,341 \times RDVI}$	0,7248
3. Índice de Proporción Simple (SR)	$125,18 e^{-0,412 \times SR}$	0,6625
4. Proporción Modificada Simple (MSR)	$105,61 e^{-1,117 \times MSR}$	0,7318

TABLA 9. Funciones de producción de porcentaje de pasto seco sobre pasto fresco y coeficientes de correlación de los Índices de Vegetación utilizados.

TABLA 9. Production functions of percentage of dry grass on fresh grass and correlation coefficients used in the Vegetation Indexes.

son índices descriptivos y por lo tanto deben tomarse con cuidado considerando también la variabilidad de los datos obtenidos en campo. En todo caso, estas funciones deben tomarse con precaución y aplicarse como unos estimadores de posibles tendencias sobre la cantidad de pasto presente en un determinado lugar.

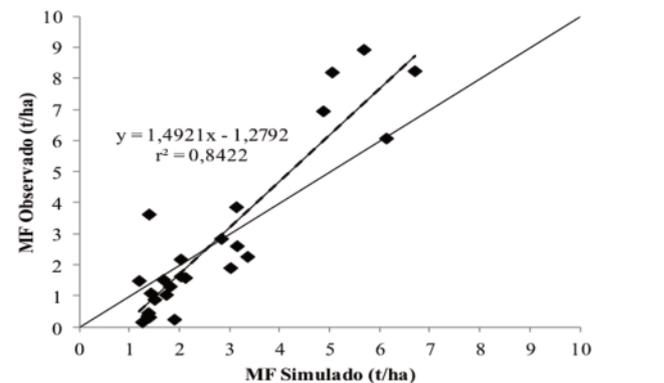
Nuestros resultados son similares a los obtenidos por Paruelo *et al.* (1997) para las llanuras centrales de los Estados Unidos y similares a los obtenidos en otras zonas semiáridas. Al igual que sucede en zonas más húmedas de la península ibérica

Tipo de Función del pasto fresco × Función porcentaje de materia seca sobre materia fresca	Función de producción	Coefficiente de determinación r^2
1. Lineal × exponencial	$[12,55 \times NDVI - 1,6548] \times [237,13 e^{-3,874 \times NDVI}]$	0,6734
2. Lineal × lineal	$[12,550 \times NDVI - 1,6548] \times [183,17 \times NDVI + 127,85]$	0,5345
3. Exponencial × exponencial	$[0,7176 e^{3,5574 \times NDVI}] \times [237,13 e^{-3,874 \times NDVI}]$	0,4741
4. Exponencial × lineal	$[0,7176 e^{3,5574 \times NDVI}] \times [183,17 \times NDVI + 127,85]$	0,0606

TABLA 10. Funciones de producción de pasto seco y coeficientes de correlación a partir del NDVI.

TABLA 10. Production functions of dry grass and correlation coefficients obtained from NDVI.

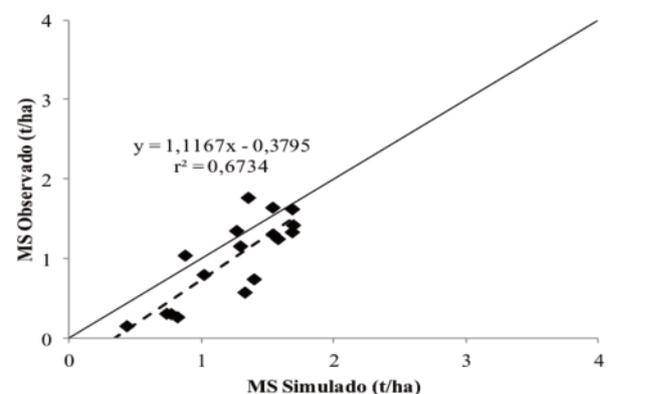
las cuatro combinaciones posibles que relacionan el pasto fresco y la relación pasto seco sobre pasto fresco (Tabla 10). El mejor de los resultados corresponde a la función de pasto fresco obtenida del ajuste lineal y la función de porcentaje de pasto fresco sobre pasto seco obtenida del ajuste exponencial, para los valores del NDVI entre 0,20 y 0,65.



Validación de las funciones de producción

FIGURA 11. Relación existente entre el pasto fresco estimado según la función de producción y pasto fresco recogido en campo durante 2012 y 2013.
FIGURE 11. Relationship between fresh grass estimated with the production function and fresh grass collected in the field during 2012 and 2013.

Los datos obtenidos en 2012 y 2013 se han utilizado para validar las funciones de producción de biomasa del pasto fresco y seco. Las comparaciones entre los valores observados y estimados de pasto fresco (Figura 11) han mostrado un coeficiente de correlación lineal (r^2) de 0,842. Sin embargo, las comparaciones entre los valores observados y estimados de pasto seco (Figura 12) mostraron unos coeficientes de correlación (r^2) de 0,673. En este último caso, la función propuesta estaría sobreestimando la cantidad de pasto en materia seca presente en el lugar.



La función para la estimación del pasto fresco a partir del NDVI presenta un buen comportamiento (Tabla 11): el coeficiente residual de masa (0,023) está próximo a su valor óptimo que es cero, el indicador Eficiencia del modelo (0,985) también está próximo al valor óptimo, y el error de desviación medio (-65 kg/ha) es bajo. La función propuesta subestima los valores altos, debido seguramente a una saturación del índice NDVI cuando hay mucha biomasa fresca, y tiende a sobrestimar ligeramente los valores bajos. Sin embargo, la función propuesta para la estimación del pasto seco presenta resultados menos precisos, sobrestimando la cantidad de pasto seco. Los errores cuadráticos son altos, así el RRMSE da errores del 48% y el 31% respectivamente. Todos ellos

FIGURA 12. Relación existente entre el pasto seco estimado según la función de producción y pasto seco recogido en campo durante 2012 y 2013.
FIGURE 12. Relationship between dry grass estimated with the production function and dry grass collected in the field during 2012 and 2013.

Índice	Valor Función Producción Pasto Fresco	Valor Función Producción Pasto Seco
Error de desviación medio (MBE)	-65	160
Error cuadrático medio (RMSE o CME)	1329	312
Error cuadrático de la media relativo (RRMSE)	48	31
Coefficiente residual de masa (CRM)	0,023	-0,234
Eficiencia del modelo (EF)	0,985	-0,55

TABLA 11. Índices de calidad de las funciones de producción de pasto fresco y seco a partir de los valores de NDVI.

TABLE 11. Quality indexes of the production function of fresh and dry grass estimated from NDVI.

(Aldezabal *et al.*, 2010), el NDVI se satura en condiciones de elevada producción (Aldezabal *et al.*, 2010). La función de producción de pasto seco a partir del NDVI, muestra un coeficiente de correlación lineal de 0,67, similar al modelo de estimación de la producción de pasto seco de Hill *et al.* (2004) que está entre 0,64 y 0,87. Ese modelo, además del NDVI utiliza para la estimación de la producción de pasto seco la radiación solar, el contenido de agua del suelo y la temperatura. Trabajos futuros deberían aplicar esta metodología para pastos con arbolado como es el caso de las dehesas y la evaluación del efecto del arbolado sobre la relación NDVI-producción de pasto, pues el arbolado también contribuiría al valor del índice de vegetación medido por los sensores. En la actualidad, el seguro de compensación por pérdida de pastos mide el índice de vegetación en zonas homogéneas desarboladas, por lo que incorporar zonas arboladas en la teledetección podría contribuir a mejorar la precisión del seguro indexado. Teniendo en cuenta las limitaciones de escala de este trabajo, los resultados alcanzados han mostrado, para las tres zonas estudiadas, que el NDVI es el índice que mejor relación presenta con la cantidad de pasto en pie, como ya habíamos indicado en estudios previos (Escribano y Hernández Díaz-Ambrosia, 2013), aunque no llega a explicar toda la variabilidad encontrada en campo.

CONCLUSIONES

De los índices de Vegetación utilizados para estimar la cantidad de biomasa de los pastos herbáceos en las dehesas españolas, el NDVI (Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada) es el que mejor correlación presenta con la cantidad de pasto fresco y seco. La función de producción propuesta a partir del NDVI-DEIMOS-1 indica que este es un buen estimador de la cantidad de pasto fresco para las dehesas españolas ($r^2 = 0,842$), aunque la estimación obtenida para el pasto seco fue algo menos precisa ($r^2 = 0,673$).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en parte con el proyecto «Recogida y procesamiento de información agronómica y zootécnica obtenida “in situ” y su integración satelital de precisión

para la mejora del seguro para la cobertura de los daños por sequía en pastos 2010 y 2013» financiado por ENESA y realizado en el CEIGRAM. Agradecemos también a los ganaderos por poder disponer de sus dehesas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROSEGURO, 2005. *Informe Anual 2005*. Disponible en internet: <http://www.agroseguro.es>

AGROSEGURO, 2013. *Informe Anual 2013*. Disponible en internet: <http://www.agroseguro.es>

ALCARAZ-SEGURA D., BALDI G., DURANTE P. Y GARBULSKY M.F. (2008) Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas*, 17 (3), 108-117.

ALDEZABAL A., MANDALUNIZ N., CAMPOS A., AZPIROZ M. Y URIARTE L. (2010) Evaluación del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) como indicador de la biomasa aérea del pasto denso (Hábitat 6320). En: Calleja A. *et al.* (Eds) *Pastos: Fuente natural de energía*, pp 197-202. Zamora, España: Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.

BÁEZ K. (2012) *Estrategias innovadoras para la gestión del riesgo de sequía en sistemas ganaderos extensivos*. Tesis doctoral. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

BIELZA M., CONTE C., DITTMANN C., GALLEGO J. Y STROBLMAIR J. (2009) Experiencias de gestión de riesgos y crisis en la Unión Europea. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 221, 127-150.

CARROLL R.J. Y RUPPERT D. (1988) *Transformation and Weighting in Regression*, Chapman and Hall, New York.

CHEN J. (1996) Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Remote Sensing of Environment*, 22, 229-242.

CHENG Y.B., ZARCO-TEJADA P.J., RIAÑO D., RUEDA C.A. Y USTIN S.L. (2006) Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366.

CHUVIECO E., DESHAYES M., STACH N., COCERO D. Y RIAÑO D. (1999) Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. En: Chuvieco E. (ed) *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin.*, pp 17-34. Berlin, Alemania: Springer-Verlag.

CHUVIECO E. (2008) *Teledetección Ambiental*. Tercera Edición. Barcelona, España: Editorial Ariel.

ESCRIBANO J.A. Y HERNÁNDEZ (2013) Estimación de la producción de pastos en Dehesas mediante índices de vegetación. En: Olea L. *et al.* (Eds) *Los pastos: nuevos retos, nuevas oportunidades*, pp 465-472. Badajoz, España: Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.

- FERRER C., SAN MIGUEL A. Y OLEA L. (2001). *Nomenclátor básico de pastos en España*. Pastos, XXXI(1): 7-44.
- FILA G., BELLOCCHI G., ACUTIS M. Y DONATELLI M. (2001) *IRENE: Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates*. Bologna, Italia: ISCI.
- GATES, D. M. (1964). Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal*, 56(3), 273-277.
- HERNÁNDEZ DÍAZ-AMBRONA C. (1998) *La dehesa, un sistema agro-silvo-pastoral para el tercer milenio*. Agricultura 67 (suplemento 16, 789), 1, 3-4.
- HILL M.J., DONALD G.E., HYDER M.W. Y SMITH R.C.G. (2004) Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 528-545.
- HUETE A. R. (1988) A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment*, 25, 295-309.
- JACKSON R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J., & PINTER, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*, 17(4), 1133-1138.
- JORDAN C.F. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.
- KERR J. Y OSTROVSKY M. (2003) From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 299-305.
- MAGRAMA (2013) Anuario de Estadística 2012. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/estadistica/pags/anuario/2012/AE_2012_Completo.pdf.
- MARTÍNEZ J., CEBALLOS A. y LUENGO M.A. (2001) La sequía edáfica en la cuenca del Duero. *Ecosistemas*, 10 (3), 8 pp.
- PARUELO J.M., EPSTEIN H.E., LAUENROTH W.K. Y BURKE I.C. (1997) ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology*, 78, 953-958.
- QI J., CHEHBOUNI A., HUETE R. Y KERR Y. (1994) Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126.
- ROUGEAN J.L. Y BREON F.M. (1995) Estimating PAR absorbed by vegetation from bi-directional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375-384.
- ROUSE J.W. JR., HAAS R.H., SCHELL J.A. Y DEERING D.W. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. College Station, Texas, Estados Unidos: *Remote Sensing Center*, Texas A&M Univ.
- RYAN T.P. (1997) *Modern Regression Methods*, Wiley, New York
- SÁNCHEZ DE RON D., ELENA ROSELLÓ R., ROIG S. Y GARCÍA DEL BARRIO J.M. (2007) Los paisajes de dehesa en España y su relación con el ambiente geoclimático. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 22, 171-176.
- SCHOWENGERDT R.A. (2007) *Remote sensing: models and methods for image processing* (3rd ed.). London, United Kingdom: Academic Press.
- SEPULCRE-CANTÓ G., ZARCO-TEJADA P.J., JIMÉNEZ-MUÑOZ J.C., SOBRINO J.A., DE MIGUEL E. Y VILLALOBOS F.J. (2005) Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136, 31-44.
- SIAR (2013) Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. Madrid, España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en internet: <http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>