

RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE TURC Y EL RENDIMIENTO DE LA ALFALFA EN LA ESPAÑA PENINSULAR

POR

M. J. MÉNDEZ, C. HONTORIA, M. C. DÍAZ Y A. SAA*

Introducción

La estimación del rendimiento de los cultivos a partir de factores climáticos resulta de especial interés en los seguros agrarios. Desde hace algunos años, se está produciendo en España un acelerado desarrollo en este campo con la modernización de las primas de los seguros agrarios y la ampliación de la cobertura de riesgos (Burgaz y Pérez-Morales, 1996). En este contexto, se hace necesario profundizar en el estudio de las relaciones entre el rendimiento y los factores climáticos con el objeto de establecer un sistema de predicción de la evolución de los rendimientos de las cosechas.

Según la metodología clásica (Jensen, 1968), también recogida en trabajos recientes (Abbaspour, 1994), la relación entre el rendimiento de los cultivos y los factores climáticos en zonas donde el déficit de agua es el factor limitante, responde a una expresión del tipo: $Y = Y_a \cdot k \cdot [(ETR/ETP)^{\lambda_1} \cdot (ETR/ETP)^{\lambda_2} \dots (ETR/ETP)^{\lambda_n}]$, donde el rendimiento Y es proporcional al rendimiento medio Y_a , o alternativamente al rendimiento máximo, por el producto de los índices de aridez, ETR/ETP , de los distintos estados fenológicos (1, 2 ... n) del cultivo, afectados por un coeficiente λ_i en función de la relevancia del estrés hídrico para la pro-

* Departamento de Edafología. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

ducción en cada etapa. Para el índice de aridez, ETR es la evapotranspiración real y ETP la evapotranspiración potencial.

Por otra parte, en Bootsma, Boisvert y Dumanski (1994) se encuentran distintas expresiones del rendimiento a partir de datos climáticos que se podían sintetizar en un modelo de tipo: $Y = Y_a \prod_1^n [k_0 \cdot Fs + k_1 \cdot Fs \cdot t_m + k_2 \cdot Fs \cdot t_m^2]$. En esta expresión, el rendimiento en cada etapa fenológica es el producto del factor o índice de aridez, $Fs = ETR/ETP$, por un polinomio de segundo orden de la temperatura media t_m . Con una expresión de este tipo se consigue no fijar a priori las condiciones de crecimiento de cada cultivo con la temperatura, que dependerán de los coeficientes empíricos 'k'.

Los modelos de rendimiento más modernos requieren datos de micrometeorología en periodos cortos (diarios u horarios incluso), datos del suelo, de técnicas de manejo y de fenología de los cultivos. El principal inconveniente de estos modelos es la dificultad de obtener este elevado número de datos fuera de parcelas experimentales, lo que hace prácticamente inviable su aplicación en áreas relativamente grandes o exige tal grado de estimación en la aproximación de los datos de partida que la validez de los resultados queda cuestionada. Se hace por tanto necesario encontrar un índice que requiera datos de entrada fácilmente disponibles o, al menos, que permita una estimación relativamente sencilla de esta información.

El índice de potencialidad agrícola de Turc (Turc, 1967; Turc y Lecerf, 1972) se ha aplicado tradicionalmente en España en los estudios relacionadas con la transformación de secano en regadío (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1979). Se aprecia en este índice una clara analogía con el esquema de Jensen (1968) ya que en él se multiplica el factor de sequedad Fs , que presenta la forma ETR/ETP , por una función de temperatura. Cabe esperar, por tanto, que este índice resulte válido para estimar la producción de masa vegetal y, en concreto, estimar el rendimiento de la alfalfa, que fue precisamente uno de los cultivos utilizados por Turc para validar su índice. En comparación con los modelos anteriores, cabe distinguir dos diferencias principales: i) el índice de Turc considera periodos mensuales y los periodos fenológicos han de ajustarse a meses y, ii) no existe efecto multiplicador puesto que los resultados mensuales se suman en lugar de multiplicarse. Sin embargo, estas diferencias no se consideran relevantes cuando se aplica el índice de Turc para modelizar el rendimiento de la alfalfa por tratarse de un cul-

tivo que se recupera con relativa facilidad tras un periodo de estrés crítico (Guerrero, 1984).

El objetivo del presente trabajo es estudiar el valor del índice de productividad de Turc como estimador del rendimiento de la alfalfa en la España Peninsular, dentro del contexto de modelización de rendimientos para el cálculo de primas de seguros.

Material y métodos

Los datos utilizados en este estudio son, por un lado, los relativos a los factores climáticos y, por otro, los relativos a los rendimientos del cultivo de la alfalfa en secano. Con respecto a estos últimos, al tener como objetivo modelizar el rendimiento de alfalfa para la España Peninsular, debemos partir de rendimientos históricos del cultivo en secano para el conjunto del territorio. La escasez de datos fiables de rendimiento del cultivo a mayor escala ha obligado al uso de los rendimientos en secano a nivel provincial recogidos en los anuarios estadísticos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. De estos anuarios, se han extraído los rendimientos y la superficie del cultivo de las 38 provincias donde se cultivó la alfalfa durante el periodo 1979-1995. No se usaron los datos anteriores a 1979 para evitar que rendimientos de periodos más antiguos obtenidos bajo otras técnicas de manejo tuviesen un efecto reductor en los modelos a desarrollar.

Los datos climatológicos han sido suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología en el marco del convenio de realización del proyecto que da lugar a este trabajo. Se seleccionaron 482 estaciones termopluviométricas de la península con datos entre 1966 y 1996 y se procedió al relleno de la serie por interpolación lineal aplicando las mejores ecuaciones de regresión obtenidas a partir de los datos de las estaciones vecinas.

El uso de datos provinciales de rendimiento de la alfalfa obliga a que los parámetros del modelo también se generalicen a nivel provincial con los problemas que esto supone. El clima medio provincial fue definido como el parámetro medio de todas las estaciones pertenecientes a la provincia. Alternativamente, el clima medio provincial se definió considerando sólo las 2 y 3 estaciones de mayor altitud de la provincia, bajo el supuesto de que la alfalfa predominaría en zonas más húmedas y altas.

Sin embargo, esta definición del clima provincial aportó peores correlaciones y fue finalmente descartada.

Con el objetivo de facilitar la discusión del método original (Turc, 1967; Turc y Lecerf, 1972) y las consideraciones metodológicas que se realizan, se recoge en el Apéndice el método de cálculo del índice de potencialidad agrícola de Turc expresado en la notación que suele ser habitual en España.

La evapotranspiración de Turc, requerida por el método de cálculo original, no pudo ser obtenida directamente ante la falta de datos de humedad relativa en la mayoría de las estaciones meteorológicas. Para solventar esta dificultad, se calculó la evapotranspiración según el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) y a partir de ella se estimó la evapotranspiración de Turc según las relaciones entre las distintas formulaciones de evapotranspiración obtenidas por Hontoria (1995). El dato de insolación, que únicamente está disponible en las estaciones meteorológicas principales, fue estimado según el método de Rey (1999) que se basa en la precipitación y la temperatura media de máximas y está adaptado a las condiciones de la España peninsular. Una modificación introducida en el cálculo del índice de Turc consistió en establecer distintos valores de la reserva máxima de agua del balance hídrico probándose valores de 50 mm y de 150 mm. Sin embargo, la reserva estándar de 100 mm fue la que mejores resultados aportó y fue finalmente adoptada.

El establecimiento de los distintos periodos fenológicos de la alfalfa para todas las provincias y años sería una labor ardua que finalmente nos enfrentaría a la valoración de su influencia en el rendimiento final (equivalente a la estimación de los coeficientes λ de la fórmula de Jensen, 1968). Por ello, y basándonos en el poder de recuperación de la alfalfa y su aprovechamiento en las distintas estaciones, optamos por un modelo lineal de las cuatro estaciones del año que considera el aporte de masa vegetal de cada una de esas estaciones en forma independiente. Las estaciones se definen como invierno (diciembre del año anterior, enero y febrero), primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto) y otoño (septiembre, octubre y noviembre).

Para la obtención de los modelos climáticos de estimación de rendimientos se correlacionaron los rendimientos medios provinciales para el periodo de datos considerado con la climatología media provincial para ese mismo periodo representada por el índice de Turc y sus

diversas variantes. Para flexibilizar el estudio, se consideraron como modelos tanto el índice de Turc como algunos de sus componentes por separado, a saber, el factor de aridez, el factor de aridez por la temperatura media y el factor de aridez por el cuadrado de la temperatura media. De esta forma, nos ajustamos a la expresión de Bootsma, Boisvert y Dumanski (1994), que generaliza la relación entre el factor de aridez y el factor térmico según la expresión: $k_1 \cdot Fs \cdot tm + k_2 \cdot Fs \cdot tm^2$, siendo k_1 y k_2 dos coeficientes empíricos a obtener. El factor solar queda indirectamente recogido en el factor de la temperatura y, en último caso, se incluye en el cálculo del índice de Turc. Los 17 parámetros climáticos considerados en este estudio se muestran en el Cuadro I.

CUADRO I
PARÁMETROS CLIMÁTICOS ESTUDIADOS

CA	índice de Turc anual
CA _i	índice de Turc de invierno (diciembre año anterior, enero y febrero)
CA _p	índice de Turc de primavera (marzo, abril y mayo)
CA _v	índice de Turc de verano (junio, julio y agosto)
CA _o	índice de Turc de otoño (septiembre, octubre y noviembre)
Fs _i	factor de aridez de invierno
Fs _p	factor de aridez de primavera
Fs _v	factor de aridez de verano
Fs _o	factor de aridez de otoño
FsT _i	factor de aridez por temperatura media, ambos de invierno
FsT _p	factor de aridez por temperatura media, ambos de la primavera
FsT _v	factor de aridez por temperatura media, ambos de verano
FsT _o	factor de aridez por temperatura media, ambos de otoño
FsT _i ²	factor de aridez por temperatura media al cuadrado, ambos de invierno
FsT _p ²	factor de aridez por la temperatura media al cuadrado, ambos de primavera
FsT _v ²	factor de aridez por la temperatura media al cuadrado, ambos de verano
FsT _o ²	factor de aridez por la temperatura media al cuadrado, ambos de otoño

Resultados y discusión

En el Cuadro II se recogen los estadísticos de los valores de rendimiento de la alfalfa, la superficie del cultivo y el índice de Turc para la España peninsular. Se observa que los rendimientos y superficies son muy variables en las 38 provincias en las cuales se cultiva la alfalfa, sin que haya ninguna relación significativa entre ambas de forma que en las zonas de mayor rendimiento no se dan mayores superficies cultivadas y viceversa. Entre los índices estacionales de Turc, destaca la alta variabilidad del invierno, verano y otoño, resultando la primavera menos diferenciada.

CUADRO II

ESTADÍSTICOS DEL RENDIMIENTO Y SUPERFICIE DE LA ALFALFA Y DEL ÍNDICE DE TURC ANUAL Y ESTACIONAL PARA LA ESPAÑA PENINSULAR (38 PROVINCIAS CON CULTIVO)

	Rendimiento (kg/ha)	Superficie (ha)	CA anual	CA_i	CA_p	CA_v	CA_o
Media	20.474,6	2.040,0	13,42	0,93	6,57	3,67	2,26
Desviación típica	10.886,7	3.240,4	6,93	0,99	2,09	3,38	1,61
Coef. Variación %	53	159	48	107	32	92	71
Mínimo	8.361,7	26,5	5,21	0,05	3,31	0,41	0,52
Máximo	46.711,5	16.516,5	31,75	4,03	10,42	14,84	6,30

El mapa de los rendimientos medios de alfalfa por provincias se muestra en la Figura 1. Se observa que los valores mayores se localizan en la cornisa cantábrica mientras que las zonas cultivadas con menores rendimientos son las dos mesetas y Levante. El índice de Turc anual por provincias para la España Peninsular se muestra en la Figura 2. En este mapa se aprecian altos valores en las zonas norte y noroeste de la Península, así como en la costa mediterránea desde Cataluña hasta Valencia. También son de destacar los valores relativamente altos de la serranía y costa de Cádiz y la vertiente sur de Gredos. En contraste, se observan los valores más bajos en la zona oeste de la meseta norte, la Mancha, la Alcarria, la zona central de las Cordilleras Ibérica y Penibética y la zona árida almeriense.

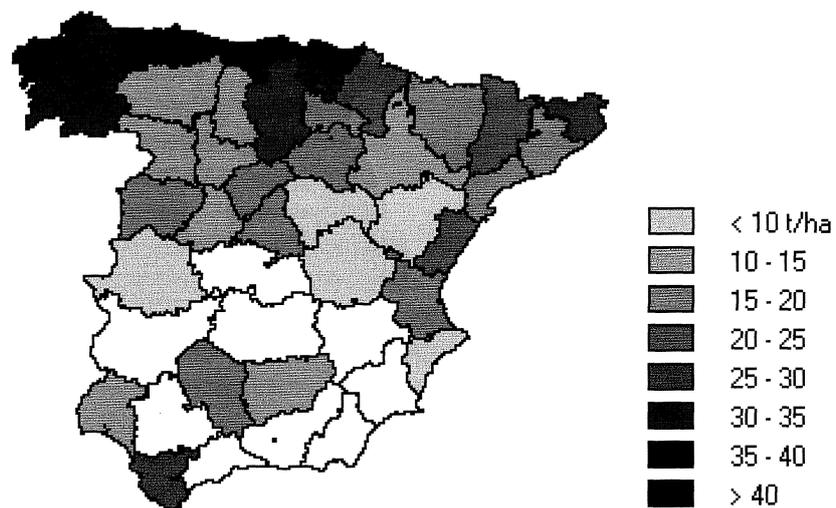


FIG. 1.—Rendimiento provincial medio del cultivo de alfalfa en la España peninsular.

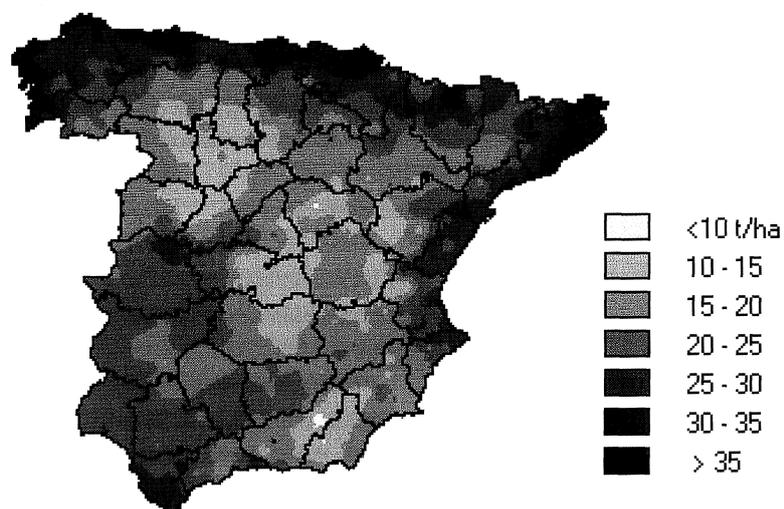


FIG. 2.—Índice de productividad de TURC anual para la España peninsular.

En el Cuadro III se presenta la matriz de correlación entre las variables estudiadas. Se aprecia en primer lugar que el rendimiento provincial de alfalfa y el índice de Turc anual tienen un coeficiente de correlación de 0,81. Los índices estacionales de verano y otoño presentan coeficientes ligeramente más altos, el de primavera es más bajo y el de invierno no es significativo. Este comportamiento del periodo invernal se explica, por una parte, porque las temperaturas no suelen ser favorables al crecimiento y, por otra, por la sensibilidad al encharcamiento de la alfalfa (Guerrero, 1984). El patrón de variación estacional se mantiene para el resto de índices, pasando a ser los correspondientes al otoño los que presentan correlaciones más altas.

CUADRO III
MATRIZ DE CORRELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO DE LA ALFALFA Y EL ÍNDICE DE TURC ANUAL, ESTACIONAL Y DERIVADOS

	A	CA	CA _i	CA _p	CA _v	CA _o	Fs _i	Fs _p	Fs _v	Fs _o	FsT _i	FsT _p	FsT _v	FsT _o	FsT _i ²	FsT _p ²	FsT _v ²	FsT _o ²
A		0,81	-0,13	0,59	0,84	0,82	0,58	0,75	0,84	0,86	0,37	0,70	0,83	0,86	0,28	0,48	0,81	0,82
CA	0,81		0,18	0,86	0,88	0,96	0,49	0,65	0,87	0,86	0,62	0,88	0,89	0,95	0,54	0,77	0,90	0,97
CA _i	-0,13	0,18		0,48	-0,27	0,04	-0,41	-0,42	-0,28	-0,27	0,78	0,26	-0,25	-0,05	0,86	0,57	-0,21	0,06
CA _p	0,59	0,86	0,48		0,55	0,72	0,38	0,45	0,53	0,54	0,87	0,95	0,56	0,71	0,80	0,97	0,59	0,76
CA _v	0,84	0,88	-0,27	0,55		0,91	0,61	0,79	1,00	0,96	0,21	0,67	1,00	0,94	0,11	0,42	0,99	0,90
CA _o	0,82	0,96	0,04	0,72	0,91		0,46	0,62	0,90	0,93	0,47	0,75	0,92	0,99	0,38	0,61	0,93	0,99
Fs _i	0,58	0,49	-0,41	0,38	0,61	0,46		0,90	0,62	0,65	-0,01	0,61	0,59	0,54	-0,09	0,34	0,57	0,47
Fs _p	0,75	0,65	-0,42	0,45	0,79	0,62	0,90		0,80	0,81	0,05	0,69	0,78	0,71	-0,04	0,37	0,75	0,64
Fs _v	0,84	0,87	-0,28	0,53	1,00	0,90	0,62	0,80		0,96	0,18	0,65	1,00	0,93	0,09	0,40	0,99	0,89
Fs _o	0,86	0,86	-0,27	0,54	0,96	0,93	0,65	0,81	0,96		0,20	0,67	0,96	0,96	0,11	0,42	0,95	0,91
FsT _i	0,37	0,62	0,78	0,87	0,21	0,47	-0,01	0,05	0,18	0,20		0,73	0,22	0,43	0,98	0,90	0,25	0,52
FsT _p	0,70	0,88	0,26	0,95	0,67	0,75	0,61	0,69	0,65	0,67	0,73		0,67	0,77	0,65	0,92	0,69	0,80
FsT _v	0,83	0,89	-0,25	0,56	1,00	0,92	0,59	0,78	1,00	0,96	0,22	0,67		0,94	0,13	0,44	1,00	0,91
FsT _o	0,86	0,95	-0,05	0,71	0,94	0,99	0,54	0,71	0,93	0,96	0,43	0,77	0,94		0,34	0,60	0,95	0,99
FsT _i ²	0,28	0,54	0,86	0,80	0,11	0,38	-0,09	-0,04	0,09	0,11	0,98	0,65	0,13	0,34		0,86	0,16	0,44
FsT _p ²	0,48	0,77	0,57	0,97	0,42	0,61	0,34	0,37	0,40	0,42	0,90	0,92	0,44	0,60	0,86		0,47	0,66
FsT _v ²	0,81	0,90	-0,21	0,59	0,99	0,93	0,57	0,75	0,99	0,95	0,25	0,69	1,00	0,95	0,16	0,47		0,92
FsT _o ²	0,82	0,97	0,06	0,76	0,90	0,99	0,47	0,64	0,89	0,91	0,52	0,80	0,91	0,99	0,44	0,66	0,92	

A= alfalfa (kg/ha). En negrita se indican los coeficientes de correlación significativos al 99,99%.

Se observa en el Cuadro III la alta correlación existente entre muchas de las variables independientes consideradas en el estudio, lo que representa un alto riesgo de colinealidad si se incorpora más de una variable

en los modelos de rendimiento. El análisis factorial (Cuadro IV) revela el fuerte agrupamiento de las variables en los tres factores con autovalores mayores que 1. El primer factor, que explica el 65% de la varianza, agrupa los índices correspondientes al verano y el otoño. El segundo factor, que explica el 25% de la varianza, incluye los índices de invierno y primavera. Por último, el tercer factor compuesto por los índices de sequedad Fs, explica el 7% de varianza.

CUADRO IV
PESOS DE LAS VARIABLES PARA LOS TRES PRIMEROS FACTORES
(AUTOVALORES MAYORES QUE 1) TRAS ROTACIÓN VARIMAX

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
CA _i	-0,230028	0,851176	-0,368351
CA _p	0,437481	0,833562	0,282191
CA _v	0,946229	0,0601798	0,29154
CA _o	0,918629	0,338437	0,118795
Fs _i	0,370518	-0,0267034	0,901001
Fs _p	0,593675	-0,0170129	0,777735
Fs _v	0,942449	0,0384185	0,301387
Fs _o	0,92647	0,0619699	0,326975
FsT _i	0,165047	0,973352	-0,044176
FsT _p	0,50094	0,685095	0,51736
FsT _v	0,949557	0,0782304	0,275972
FsT _o	0,922041	0,294053	0,216709
FsT _i ²	0,0791	0,980674	-0,103363
FsT _p ²	0,299455	0,895163	0,289471
FsT _v ²	0,949538	0,11367	0,252377
FsT _o ²	0,895667	0,391433	0,152894
Varianza acumulada explicada	65,3	90,6	97,1

Los modelos obtenidos a partir de los índice anual y estacional de Turc se presentan en el Cuadro V. El índice de Turc anual explica por sí sólo el 65% de la variabilidad de los rendimientos provinciales de alfalfa (modelo A1). El índice de Turc del verano (modelo A2) es el índice que más varianza explica en solitario (69%), lo cual es lógico si consi-

CUADRO V
 MODELOS DE REGRESIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO DE LA ALFALFA
 Y LOS ÍNDICES DE TURC, ANUAL Y ESTACIONALES

Modelo	R^2	R^2_{adj}	EEE
A1 A (kg/ha) = 2.284,5 + 1.355,2 · CA	65,3	64,4	6.498
A2 A (kg/ha) = 1.0597,1 + 2.691,9 · CA _v	68,8	69,0	6.063
A3 A (kg/ha) = 7.990,4 + 5.520,0 · CA _o	66,9	66,0	6.348
A4 A (kg/ha) = 5.359,8 + 2.359,1 · CA _v + 983,7 · CA _p	72,3	70,7	5.888
A5 A (kg/ha) = 9.057,3 + 1.700,7 · CA _v + 2.289,0 · CA _o	71,9	70,3	5.938
A6 A (kg/ha) = 6.082,7 + 703,5 · CA _p + 1.958,8 · CA _v + 1.143,3 · CA _o	72,6	70,2	5.942
A7 A (kg/ha) = 5.082,8 - 1.398,4 · CA _i + 1.122,3 · CA _p + 1.406,5 · CA _v + 1.838,4 · CA _o	73,1	69,9	5.977
A8 A (kg/ha) = 7.542,9 + 284,1 · (CA _i + CA _p) + 1.821,5 · (CA _v + CA _o)	72,2	70,6	5.900
A9 A (kg/ha) = 6.425,1 + 571,6 · CA _p + 1.736,1 · (CA _v + CA _o)	72,5	71,0	5.865

deramos que el verano va a ser determinante para marcar diferencias entre las zonas en cuanto se pueda disponer o no de agua en esta época de temperaturas adecuadas para el crecimiento. El índice de otoño (modelo A3), que era el siguiente mejor correlacionado con el rendimiento, explica el 67% de la varianza. Si combinamos el índice de verano con otros estacionales, obtenemos buenos resultados con la primavera y el otoño (modelos A4 y A5). De hecho, el modelo A4 que combina los índices de primavera y verano es el de mayor coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{adj} = 70,7$) y menor error estándar de la estimación (EEE = 5.888). Presentamos los modelos con tres y cuatro variables (modelos A6 y A7), aunque la subida del coeficiente de determinación es artificial, quedando el parámetro ajustado y el EEE por debajo del mejor modelo. El índice de Turc del invierno entra en el modelo A7 con coeficiente negativo, esto no es de extrañar ni parece un efecto de la colinealidad ya que su relación directa con el índice de Turc es negativa. Los inviernos muy húmedos podrían reducir la producción por la sensibilidad de la alfalfa al exceso de agua. Los dos últimos modelos (A8 y A9) agrupan los índices estacionales en función de los resultados del análisis factorial,

de forma, que se suma el invierno con la primavera y el verano con el otoño. Cuando se eliminó el índice de Turc del invierno por sus problemas de correlación negativa con el rendimiento, una función del índice de Turc de primavera y la suma de los índices de Turc de verano y otoño (modelo A9) presentó los mejores resultados para estimar el rendimiento de la alfalfa ($R^2_{\text{adj}} = 71,0$, $EEE = 5.865$). Como ventaja adicional, los índices basados en sumas se consideran más estables porque están menos afectados por las condiciones específicas de una estación.

En los modelos analizados se observa una progresiva disminución de los rendimientos atribuidos a la unidad del índice de verano a medida que añadimos variables. Así, el índice de Turc del verano pasa de 2.700 kg/ha cuando es la única variable explicativa (modelo A2) a 1.400 kg/ha cuando se incluyen todos los índices estacionales (modelo A7). Incluso, en este último caso, el índice de otoño pasa a tener un mayor rendimiento por unidad; ello no invalida que sea el índice de verano el que explica un porcentaje mayor de las variaciones entre los rendimientos provinciales. Disponer de datos de rendimiento para los distintos cortes de alfalfa estacionales, probablemente ayudaría a afinar estas relaciones.

Resulta difícil comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos por Turc ya que este autor usó ratios entre rendimiento e índice, es decir, forzó a que la recta de regresión pasara por el punto (0,0). A pesar de ello, encontramos que el valor de 600 kg/ha de materia seca por unidad del índice obtenido por Turc es sensiblemente inferior al valor de 1.350 kg/ha por cada unidad del índice anual obtenido en este trabajo. Esta diferencia resulta difícil de explicar si no es por los rendimientos más bajos que se alcanzaban en la época de recolección de datos de los trabajos originales.

En el Cuadro VI se presentan los modelos basados en el factor de aridez y en el producto del éste por la temperatura. En primer lugar, se analizaron los modelos de una sola variable, siendo el integrado por el factor de sequedad del otoño (modelo B1) el que más varianza explica (73,5%). Los siguientes modelos (B2 y B3) tratan de reproducir los mejores hallazgos del apartado anterior pero en términos de factor de sequedad en lugar del índice de Turc completo. Los resultados indican que sólo con el factor de sequedad se explica más variabilidad ($R^2 = 74,3$) que con el índice de Turc o sus combinaciones estacionales. El siguiente modelo (B4) es muy sencillo, función de la suma de los factores estacionales, esto es, del factor de aridez anual, lo que previsiblemente hará que

CUADRO VI
 MODELOS DE REGRESIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO DE LA ALFALFA
 Y LOS COMPONENTES DE LOS ÍNDICES DE TURC ESTACIONALES

Modelo	R ²	R ² _{adj}	EEE
B1 A (kg/ha) = 134,0 + 14.902,1 · Fs _o	73,5	72,7	5.685
B2 A (kg/ha) = 4.715,4 + 8.082,0 · (Fs _v + Fs _o)	73,5	72,7	5.685
B3 A (kg/ha) = -2.920,0 + 4.199,7 · Fs _p + 6.864,5 · (Fs _v + Fs _o)	74,3	72,9	5.672
B4 A (kg/ha) = -21.099,3 + 5.772,2 · (Fs _o + Fs _i + Fs _p + Fs _v)	73,1	72,4	5.720
B5 A (kg/ha) = 10.532,0 + 3.885,4 · FsT _v - 164,8 · FsT _v ²	72,6	71,0	5.858
B6 A (kg/ha) = 4.033,6 + 1.703,4 · (FsT _v + FsT _o) - 72,5 · (FsT _v ² + FsT _o ²)	76,8	75,4	5.395
B7 A (kg/ha) = -11.772,0 + 2.490,1 · (FsT _v + FsT _o) - 127,2 · (FsT _v ² + FsT _o ²) + 371,2 · (FsT _i + FsT _p)	82,7	81,2	4.719
B8 A (kg/ha) = -5.807,8 - 16.446,3 · (FsT _v + FsT _o) + 4.991,7 · (FsT _v + FsT _o) - 214,7 · (FsT _v ² + FsT _o ²) + 253,7 · (FsT _i + FsT _p)	83,5	81,5	4.680
B9 A (kg/ha) = -15.089,0 + 91,1 · FsT _i ² + 15.281,2 · Fs _p - 89,8 · FsT _p ² - 35.545,3 · Fs _o + 7.970,3 · FsT _o - 317,625 · FsT _o ²	86,5	83,9	4.365

sea más estable ante las variaciones que los modelos basados en valores estacionales. Es interesante destacar que el índice de Turc anual sólo explicaba el 65% de la varianza frente al 73% explicado por el índice de sequedad anual. Se confirma que en nuestra agricultura de secano el factor limitante es el agua y otras consideraciones térmicas o solares pueden oscurecer la conexión con los rendimientos. Los modelos quinto y sexto tratan de buscar una relación entre el rendimiento de la alfalfa y una combinación de Fs con la temperatura y su cuadrado para las dos estaciones que se han mostrado más significativas en los modelos anteriores, el verano y el otoño, obteniéndose un incremento de la varianza explicada, sobre todo, en el modelo B6 (76,8%). Siguiendo en esta línea, los modelos B7 y B8 se hacen más complejos. El modelo B7 introduce el periodo de invierno-primavera y explica un 83% de variabilidad. El modelo B8 es el mejor según el estadístico Cp de Mallows, siempre considerando juntas las variables de las estaciones agrupadas por el análisis

factorial. Si consideramos todos los factores del índice de Turc por separado y realizamos una correlación paso a paso hacia atrás, eliminando en cada paso las variables de peor significación, llegamos al modelo B9, cuyas variables tienen todas coeficientes significativos al 95% y explica un 87 % de la varianza. Sin embargo, es de destacar que estos modelos, a medida que se hacen más complejos quedan fuera de una interpretación clara y directa de la regresión y aunque el test de Durbin-Watson no indica peligro de multicolinealidad, siempre cabe la duda de compensaciones entre las variables o artefactos estadísticos.

Las Figuras 3 y 4 muestran los rendimientos de la alfalfa estimados climáticamente a partir del índice de aridez anual (modelo B4) y mediante el modelo que explica más varianza (modelo B9). Se observa en los mapas una tendencia a presentar valores bajos, más acentuado en el modelo más sencillo (B4). En la interpretación de estos resultados gráficos hay que tener en cuenta lo siguiente: *i*) los modelos se han aplicado a toda la superficie de la provincia, haya realmente alfalfa o no; *ii*) los índices se han interpolado espacialmente y posteriormente se ha estimado el rendimiento; y *iii*) se han usado clases discretas para la presentación del rendimiento.

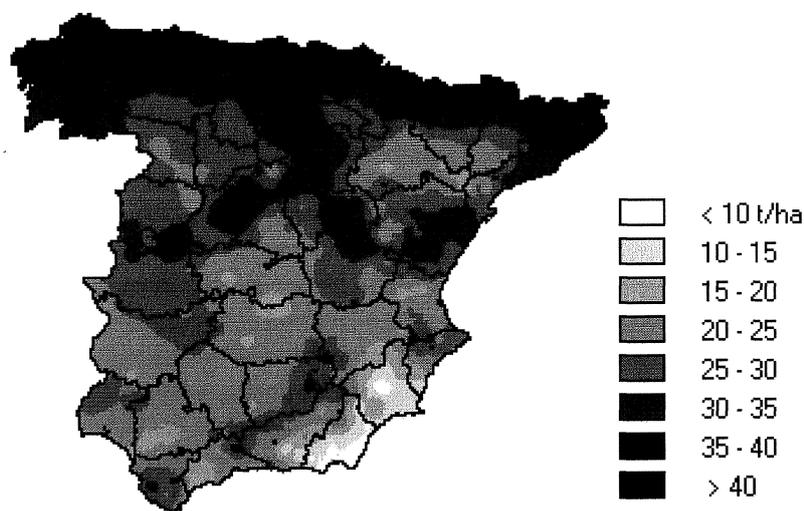


FIG. 3.—Rendimiento de la alfalfa estimado climáticamente a partir del índice de aridez anual (modelo B4).

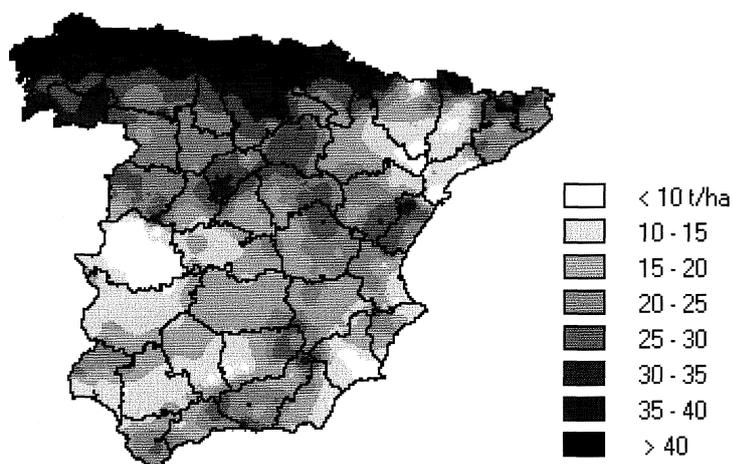


FIG. 4.—Rendimiento de la alfalfa estimado climáticamente a partir del mejor modelo de simulación (modelo B9).

En cuanto a los errores de la estimación, hacemos notar que éstos alcanzan los 4.400 kg/ha en los mejores modelos. Si consideramos que el rendimiento medio de alfalfa es de 20.500 kg/ha, estaríamos hablando de un error estándar del 20% aún explicando el 87% de la varianza (Figura 5, modelo B9).

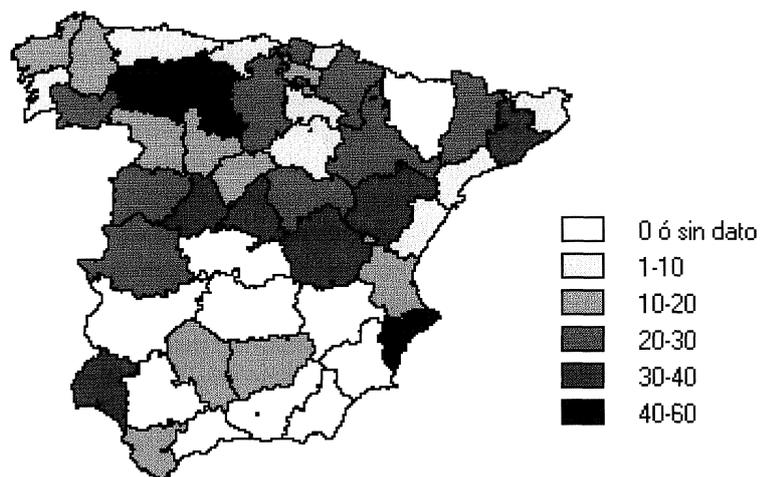


FIG. 5.—Errores (%) de la estimación del rendimiento provincial de la alfalfa (modelo B9).

Conclusiones

El verano y el otoño han demostrado ser las estaciones con mayor relevancia en el rendimiento de la alfalfa en las condiciones de cultivo de la España peninsular. El índice de Turc y las diversas combinaciones del factor de sequedad de estas estaciones muestran valores de correlación con los rendimientos provinciales de alfalfa de entre 0,84 y 0,86.

Tanto el índice de Turc como el factor de sequedad que compone dicho índice resultan válidos como modelos para estimar el rendimiento de la alfalfa a partir de factores climáticos. Su máxima ventaja frente a índices más sofisticados es la sencillez de cálculo y la relativa disponibilidad de los datos de entrada del modelo. La varianza explicada por los modelos resulta notable llegándose a explicar hasta un 87% en el caso más complejo.

Cabe destacar que un modelo muy sencillo como el integrado por el factor de sequedad anual explica un 73% de la varianza del rendimiento de la alfalfa. El hecho de que un componente del índice de Turc, el factor de aridez, explique por sí sólo más varianza que el propio índice de Turc pone de manifiesto la importancia del agua en el clima mediterráneo.

Otro hecho a resaltar es que a pesar de manejar datos climáticos de partida a escala provincial con la variabilidad asociada que ello conlleva, se han obtenido unos destacables resultados de simulación de los rendimientos de la alfalfa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la realización del estudio: «Evaluación del Riesgo de Sequía en Pastos. Primas provinciales y comarcales», financiado por la Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENE-SA) del Ministerio de Agricultura Pesca Y Alimentación. También queremos agradecer al Instituto Nacional de Meteorología que, en el contexto del estudio anterior, ha suministrado los datos climatológicos necesarios.

APÉNDICE: Método de cálculo del índice de potencialidad agrícola de Turc

El índice de Turc (CA) se calcula mensualmente como producto de tres factores: el factor solar (Fh), el factor térmico (Ft) y el factor de sequedad (Fs), denominándose factor heliotérmico al producto de los dos primeros. El índice de Turc anual o estacional se calcula como suma de los índices mensuales correspondientes.

El factor solar Fh evalúa la disponibilidad de radiación solar para la actividad fotosintética. Se basa en el cálculo de dos índices de los cuales se toma el mínimo, que se sustituye por cero si es negativo. El primer índice del factor solar evalúa los efectos de saturación de la luz y el segundo supone una estimación aproximada de fotosíntesis menos respiración:

$$Fh = \text{máximo} [0 \text{ y } \min (N - 5 - (\varphi / 40)^2; 0,03 \cdot (Rs - 100))]$$

siendo N la insolación máxima diaria (astronómica, h día⁻¹), φ la latitud (grados) y Rs la radiación solar (cal cm⁻² día⁻¹) a nivel de suelo según Turc (1961) calculada como $Rs = Ra \cdot (0,18 + 0,62 (n/N))$, donde Ra es la radiación solar extraterrestre (cal cm⁻² día⁻¹) y n es la insolación eficaz (h día⁻¹).

El factor térmico Ft se compone de una función de producción dependiente de la temperatura media y de una corrección por daños por helada que se aplica sólo cuando éstos son relevantes.

$$Ft = \begin{cases} [tm (60-tm)/1000] & \text{si } t \geq 5 \\ [tm (60-tm)/1000] \cdot [(t-1)/4] & \text{si } 1 < t < 5 \\ 0 & \text{si } t \leq 1 \end{cases}$$

siendo 'tm' la temperatura media mensual y 't' la media de mínimas mensuales, ambas en °C.

La función de producción inherente a este factor térmico es un polinomio de segundo grado que toma el valor máximo (0,90) para una temperatura de 30 °C. Responde pues a la formulación general expuesta anteriormente (Bootsma, Boisvert y Dumanski, 1994) concretándola para un máximo de rendimiento que, en este caso, coincide con el máximo de

germinación (Guerrero, 1984). La función de heladas se basa en la temperatura media de mínimas, al igual que los criterios de riesgo de heladas de Emberger. Su función es anular la producción para valores de 't' menores o iguales a 1 °C y reducirla linealmente en la medida en que tome valores entre 1 y 5 °C. Para valores mayores de 5 °C, se considera que no afectan las bajas temperaturas al rendimiento. Este comportamiento correspondería a una función de producción ya que la alfalfa llega a soportar temperaturas de -10 °C y -15 °C (Guerrero, 1984).

El factor de sequedad Fs se establece como el cociente entre la evapotranspiración real obtenida mediante un balance hídrico directo con reserva máxima de 100 mm, y la evapotranspiración calculada según el método de Turc (1961). Se calcula un parámetro mensual X, que es el valor mínimo entre la evapotranspiración de Turc y el valor de la expresión $(0,3 \cdot ETP_{Turc}) + 50$. Es decir, reducimos los valores elevados de evapotranspiración, limitando a 50 mm el 70% de la ETP. El valor reducido de evapotranspiración no se emplea en el balance hídrico, sino únicamente en el cálculo final del factor de sequedad Fs.

El valor básico para el cálculo del factor de sequedad es el cociente $(X-F)/X$. Si consideramos que X representa una evapotranspiración reducida y que según el balance hídrico directo la falta F es la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real, el factor de sequedad tiene la forma del ratio ETR/ETP sobre una ETP modificada. El cociente $(X-F)/X$ se ajusta según el denominador 'report' que trata de compensar la aridez extrema de unos meses ($(X-F)/X < 0$) con el valor positivo de $(X-F)/X$ en meses siguientes. El 'report' se acumula, pero no puede ser menor de -1.

$$\begin{aligned} F's_i &= [(X-F)/X]_i + report_i \\ report_i &= 0 \text{ si } F's_{i-1} \geq 0 \text{ ó } [(X-F)/X]_i \leq 0 \\ report_i &= \text{máximo} (-1 \text{ y } F's_{i-1}) \text{ si } F's_{i-1} < 0 \text{ y } [(X-F)/X]_i > 0 \\ F's_i &= \text{máximo} (F's_i, 0) \text{ siendo 'i' el mes considerado e 'i-1' el anterior.} \end{aligned}$$

El valor negativo de $(X-F)/X$ es posible debido a que X es una ETP reducida mientras que F es la falta obtenida con el valor de ETP sin modificar.

BIBLIOGRAFÍA

- ABBASPOUR, K. C. (1994): «Bayesian risk methodology for crop insurance decisions». *Agri. Forest Meteorol.*, 71: 297-314.
- BOOTSMA, BOISVERT AND DUMANSKI (1994): «Climate-based estimates of potential forage yields in Canada using a crop growth model». *Agri. Forest Meteorol.*, 67: 151-172.
- BURGAZ, F. J. y PÉREZ MORALES, M. M. (1996): *1902-1992, 90 años de seguros agrarios en España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General Técnica. Madrid.
- GUERRERO, A. (1984): *Cultivos herbáceos extensivos*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- HARGREAVES, G. H. y SAMANI, Z. A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Engr. Agric.* 1(2): 96-99.
- HONTORIA, C. (1995): *El régimen de humedad de la España Peninsular*. Tesis doctoral. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- JENSEN, M. E. (1968): «Water consumption by agricultural plants». En T.T. Kozlowski, *Water deficits and plant growth*. New York: Academic Press.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (1979): *Atlas Agroclimático Nacional de España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. Varios años: *Anuario estadístico*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- REY, J. M. (1999): «Modelling potential evapotranspiration of potential vegetation». *Ecol. Model.*, 123:141-159.
- TURC, L. (1961): «Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle». *Ann. Agron.*, 12(1):13-49.
- (1967): «Incidence des facteurs macroclimatiques sur les productions végétales». *Fourrages*, 31, 10-35.
- TURC, L. y LECERF, H. (1972): «Indice climatique de potentialité agricole». *Science du sol*, 2.

RESUMEN: La modernización del sistema de seguros en España exige el uso de modelos de predicción de rendimientos de cosecha para el conjunto del territorio nacional. Muchos modelos de estimación de rendimientos son de difícil aplicación porque no están disponibles los datos de entrada. En este trabajo, se estudia la capacidad del índice de productividad de Turc y sus componentes para modelizar los rendimientos de la alfalfa a partir de datos climáticos. Para ello, se han usado los datos de rendimiento medio provincial de la alfalfa en secano de la serie 1979-1995 y los datos climáticos de 482 observatorios meteorológicos de la península de la serie 1966-1996. Se han obtenido las ecuaciones de regresión entre el rendimiento provincial de la alfalfa y el índice de Turc o diversos componentes del mismo. Un modelo basado en los factores estacionales de sequedad y en el producto de éstos por la temperatura explica un elevado porcentaje de varianza (87%). Un componente del índice de Turc, el factor de sequedad anual, llega a explicar más varianza (73%) que el propio índice anual de Turc, lo que confirma la importancia del déficit hídrico en la agricultura mediterránea. En definitiva, un índice sencillo de cálculo, que emplea datos climáticos fácilmente disponibles y que es aplicado a escala provincial resulta válido como estimador del rendimiento de cultivos de masa vegetal en las condiciones de la España peninsular.

PALABRAS CLAVE: modelos de estimación de rendimiento, índice de productividad de Turc, factor de sequedad, alfalfa, España.

ABSTRACT: The modernisation of Spanish agrarian insurance demands the use of crops yield prediction models. Many yield prediction models are difficult to apply because data are not available. In this work, we studied the performance of Turc productivity index and its components to model alfalfa yields from climatic data. Data of alfalfa provincial yields from 1979 to 1995 and climatic data from 482 peninsular meteorological stations of 1966-1996 were used. Regression equations between provincial alfalfa yield and the Turc index and its components were obtained. A model based on seasonal dryness factors and the product of these by temperature was able to explain a large variability (87%). One component of Turc index, the annual dryness factor, explained larger variance (73%) than the Turc index per se, which confirms the importance of water deficit in Mediterranean agriculture. In conclusion, an index of easy calculation, using available climatic data and applied on provincial scale was able to estimate the vegetal mass crops in the conditions of peninsular Spain.

KEY WORDS: yield prediction models, Turc productivity index, dryness factor, alfalfa, Spain.

RESUMÉE: La modernisation des assurances agricoles à l'Espagne exige l'usage de modèles pour prédire les rendements des récoltes dans l'ensemble du territoire national. Beaucoup de modèles d'estimation des rendements sont difficiles à appliquer parce que les données nécessaires ne sont pas disponibles. Dans ce travail, on étudie la capacité de l'indice de productivité de Turc et quelques de ses composantes pour modéliser les rendements de la luzerne à partir des données climatiques. Pour ceci, on a utilisé les données du rendement moyen de la luzerne dans les provinces espagnoles pour les années 1979-1995 et les données de 482 observatoires météorologiques pour les années 1966-1996. On a obtenu les équations de régression entre le rendement provincial de la luzerne et l'indice de Turc ou quelques de ses composantes. Un modèle basé aux facteurs saisonniers de sécheresse et le produit de ceux facteurs pour la température explique un pourcentage de la variance élevé (87%). Une composante de l'indice de Turc, le facteur de sécheresse annuel, explique plus de variance (73%) que l'indice de Turc annuel, ce qui confirme l'importance du déficit de l'eau à l'agriculture méditerranéenne. En conclusion, un indice simple à calculer, qui emploie des données climatiques facilement atteints et qui est appliqué à niveau provincial, succède à être un prédicteur approprié du rendement des récoltes à masse végétale pour les conditions de l'Espagne péninsulaire.

MOTS CLEF: modèles pour prédire les rendements, indice de Turc, facteur de sécheresse, luzerne, Espagne.