

ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CEBADA (*Hordeum vulgare L.*) MALTERA CON EL MÉTODO FAO*

ESTIMATION OF MALTING BARLEY (*Hordeum vulgare L.*) YIELD BY THE FAO METHOD

René Gómez Mercado^{1§}, Carlos Alberto Ortiz Solorio⁵, Mauro Zamora Díaz², Jesús Soria Ruíz³, Antonio Trinidad Santos⁴ y Aquiles Carballo Carballo⁵

¹INIFAP-Hidalgo, km 3.6 carretera Pachuca - Cd. Sahagún, Centro Comercial El Saucillo, Torre Norte 1er. piso despacho 111, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. Tel. 01 771 7136387. ²Campo Experimental Valle de México, INIFAP, km 18.5 carretera Los Reyes-Lechería C. P. 56230, Chapingo, Texcoco, Estado de México, Tel. 01 595 9542277 Ext. 126, (zamora.mauro@inifap.gob.mx). ³Laboratorio de Geomática, Campo Experimental Toluca, INIFAP, km 4.5, carretera Toluca-Zitacuaro, Zinancantepec C. P. 52176, Estado de México, México. Tel. 01 722 2784339, (soria.jesus@inifap.gob.mx). ⁴Posgrado en Edafología, IRENAT. Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, C. P. 56230. Tel. 01 595 9511474 y 9520200 Ext. 1241, (ortiz@colpos.mx), (trinidad@colpos.mx).

⁵Posgrado en Producción de Semillas. IREGEP. Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, C. P. 56230. Tel. 01 595 9520200 Ext. 1552, (carballo@colpos.mx) [§]Autor para correspondencia: gomez.rene@inifap.gob.mx.

RESUMEN

Al emplear modelos para predecir rendimientos de cultivos, con frecuencia existen limitantes por las variables que utilizan. De ahí, que resulte la necesidad de elegir al que contenga el menor número de variables o bien que éstas puedan estimarse con algún procedimiento conocido y fácil de realizar. La metodología propuesta por el proyecto de zonas agroecológicas de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) presenta esta alternativa, por su sencillez, pero a la vez con fundamentos ecofisiológicos que soportan los procesos que tienen los cultivos para producir biomasa. El uso de ese método permite validar, calibrar y hacer el ajuste, de acuerdo con sus variables, mismas que pueden calcularse en campo, de manera experimental o por un procedimiento de muestreo que evalúe una superficie o región, para corroborar que el método estima el rendimiento de manera aceptable (alta precisión y bajo sesgo). Para el caso de estudio en el cultivo de la cebada, el método no permite captar la variación local del potencial de rendimiento, pero a nivel regional produce una media aceptable, por lo que se sugiere el ampliar el estudio, para explorar la diferencia entre regiones y genotipos. Se propone un factor de ajuste a la

metodología de la FAO, para que la estimación se aproxime a la realidad, tanto por región como por genotipo. Se presenta una relación entre factor de ajuste del rendimiento y la densidad de espigas por hectárea.

Palabras clave: *Hordeum vulgare L.*, índice de área foliar, índice de cosecha, modelos de predicción.

ABSTRACT

When using models to predict crop yields, with frequency there are limitations due to the variables fed into those models. Hence, the need to select the model with either the smallest number of variables or variables that can be estimated by some well known procedures that are also easy to fit. The methodology provided by the Agro-ecological Zones Project, proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) constitutes a good alternative, not only due to its simplicity, but also for the eco-physiological principles that support the processes for biomass production by crops.

* Recibido: Enero, 2008

Aceptado: Marzo, 2009

The use of this method allows for validating, calibrating and fitting the model, according to the needed variables, these must be calculated in the field, experimentally or by a sampling procedure that evaluates an area or a region to make sure that the method estimates crop yields in an acceptable form (highly accurate and low bias). For the studied case in the barley crop, the method does not allow for the detection of the local variation in yield potential, but at a regional scale the method produces a reasonable average yield, therefore we suggest the increase of the study to explore differences among regions and genotypes. The results indicate the need for an adjustment factor to FAO's methodology, so that the estimated yield approaches reality for both, region and genotype.. A relationship between the fitting factor of crop yield and spikes density per hectare, is presented.

Key words: *Hordeum vulgare* L., harvest index, leaf area index, prediction models.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la cebada de temporal se siembra principalmente, para la elaboración de malta, y en consecuencia requiere índices de calidad industrial, que estén determinados por las cualidades genéticas, manejo, suelo y cantidad y distribución de la precipitación. Las características genéticas y el manejo agronómico son variables que pueden controlarse, pero algunas propiedades del suelo y lluvia son factores incontrolables, que resultan determinantes para obtener un buen rendimiento y una buena calidad de grano para malta (Gómez *et al.*, 2001).

La diferencia climática y de suelo para producir cultivos, hace más complejo el obtener tecnología y en consecuencia crea modelos de simulación que tengan un mayor ajuste y estimen los rendimientos de acuerdo a la fluctuación que existe entre los diferentes ambientes (Ortiz *et al.*, 2005). Bajo este principio, el

cultivo de la cebada no escapa a esa variación, además de tener un ciclo de cultivo corto y requerimientos hídricos menores que otros cultivos, como maíz, trigo y avena (Castañeda *et al.*, 2004).

De manera general, los modelos de simulación de rendimientos se clasifican en simples y complejos. Los primeros se relacionan con el clima, la biomasa y el índice de área foliar (Tinoco *et al.*, 2003; Gómez *et al.*, 2003); los segundos, involucran estas variables, pero incluyen aspectos genéticos y del suelo (Ovalle *et al.*, 2005).

Para simular y predecir el rendimiento, se han utilizado desde modelos simples empíricos hasta los complejos (Ortiz *et al.*, 2005; Castellano *et al.*, 2006). Sin embargo, cuando se trata simular el rendimiento de cultivos no existe información para cubrir los requerimientos de la mayoría de los modelos, que explican de manera teórica, los fenómenos que influyen en el rendimiento. Los modelos empíricos son más simples, pero no aclaran los procesos que ocurren para obtener rendimientos. La información no disponible se refiere al tipo de cultivar (fenología, fisiología y genética) y cómo interactúa con el clima y los suelos (Barrales *et al.*, 2004).

El propósito de este trabajo fue determinar un modelo que simule adecuadamente el rendimiento de cebada malterapara el estado de Hidalgo, con base en variables de planta y clima, sustentado en el método propuesto por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en tres regiones del estado de Hidalgo donde se siembra cebada malterapara en cada región se instaló un experimento que permitiera explorar diferentes ámbitos de producción durante el ciclo primavera-verano 2006 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de las regiones de estudio del estado de Hidalgo, México.

Región	Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Temperatura
1	Almoloya	19° 45' 14.4"	98° 21' 57"	2 730	12.2
2	Apan	19° 41' 16.6"	98° 23' 33"	2 547	14.1
3	Villa de Tezontepec	19° 54' 16.0"	98° 53' 4"	2 355	15.4

Se parte del supuesto que tiene la metodología de la FAO para estimar rendimiento, es decir, se considera que no existen limitaciones en cuanto a la humedad del suelo.

La metodología adoptada para realizar la presente investigación constó de tres etapas:

1) determinación de componentes de rendimiento de cebada en las tres regiones del estado. Para ello, se condujeron tres experimentos (Cuadro 1), con tres genotipos (Esmeralda, Adabella y M-152A) para obtener su biomasa neta (Bn), índice de cosecha (Hi), densidad de espigas por hectárea (DsE) y rendimiento de grano. El diseño experimental fue de bloques al azar, con 10 repeticiones de cada genotipo (30 parcelas experimentales). Cada unidad experimental constó de cuatro surcos a 0.30 m de ancho por 5 m de largo (6 m²).

Se obtuvo la Bn con base en raíces, tallos, hojas y espigas; Hi se calculó con la siguiente relación: Hi= rendimiento de grano/Bn total; el rendimiento de grano se calculó de acuerdo con Gómez *et al.*, 2003; se cuantificó la densidad de espigas por hectárea (DsE); y el índice de área foliar (IAF) se calculó con base a Bn de hojas y el área foliar específica (AFE) para el cultivo de cebada (FAO, 2000), de acuerdo con la siguiente ecuación: IAF=(Bn de hojas)(AFE/10000). El IAF es una variable determinante en los modelos de predicción de rendimiento que permite la estimar el rendimiento de cultivos (Loke y Soós, 2002).

2) aplicación del método FAO. La información climática se obtuvo directamente de las estaciones agroclimáticas automatizadas que se encuentran en cada localidad de estudio, localizadas de 2 a 5 km de distancia en línea recta donde se establecieron los experimentos de campo. Este método se basa en principios ecofisiológicos que consisten en obtener la cantidad total de biomasa neta (Bn) generada por el cultivo y multiplicarla por el índice de cosecha (Hi), para obtener el rendimiento estimado (Y), esto es: Y= Bn(Hi). Para tener la Bn se calcula la diferencia entre biomasa total (Bg) y las pérdidas por respiración (R), por lo que es necesario calcular la tasa de producción de biomasa neta (bn), con la tasa de producción de biomasa gruesa (bg) y la tasa de respiración (r). Es decir, bn= bg - r.

Se asume que la Bn, durante el ciclo, sigue una curva sigmoidal perfecta y que bn una curva normal, lo que resulta en una tasa promedio diaria de producción de biomasa neta de la mitad de la tasa de biomasa neta máxima (0.5bnm), con lo que se calcula Bn=0.5bnm(N), donde: N es la duración en días del ciclo del cultivo. Es necesario generar la tasa máxima de producción (bgm), la cual se relaciona con la fotosíntesis máxima (Pm), ésta a su vez depende de la temperatura media, el tipo de cultivo (C3 o C4) y la concentración de CO₂ en la atmósfera (Ortiz *et al.*, 2005).

Se calculó bgm con base a la producción de biomasa en días despejados (bc), en días nublados (bo) y la fracción del día en la que el ciclo está nublado (F): bgm= F(bo) + (1 - F)bc, donde: F=(Ac - 0.5Rg)/0.8Ac; Rg= radiación global y Ac= radiación fotosintéticamente activa.

Los valores de Ac, bc y bo se calcularon con modelos que emplean valores de radiación teórica (R_A), se consideró que si se tiene una Pm= 20 kg ha⁻¹ h⁻¹ de CH₂O, entonces bgm= F(bo) + (1 - F)bc; y si es menor que 20, la fórmula cambia a: bgm= F(bo)((100 - (x/2))/100) + (1 - F)(bc)((100 - x)/100); donde: x= |(Pm - 20)/20|(100).

Por otra parte, la respiración involucra dos procesos: crecimiento y mantenimiento, que se expresa por la ecuación Bn= 0.36bgm/((1/N) + 0.25Ct); donde Ct es el coeficiente de respiración y se obtiene de la ecuación Ct= C₃₀(0.044 + 0.0019T + 0.001T²), con C₃₀ = 0.0283 para leguminosas y 0.0108 para no leguminosas, T es la temperatura (°C) media mensual del ciclo; y N es el número de días del ciclo del cultivo. La expresión matemática de Bn es válida para un IAF > 5; cuando el IAF es < 5, se multiplica por un factor de corrección (L), que se estima como: L= 0.3424 + 0.9051(log₁₀IAF).

La radiación global (Rg) y la temperatura media se obtuvieron de las estaciones agroclimáticas automatizadas. Para el cálculo de Pm, se utilizó datos determinados por FAO (2000) (Cuadro 2). Los diversos niveles de inversión empleados para la estimación de rendimientos genera diferentes índices de cosecha (Hi) e índices de área foliar máxima (IAF), las cuales se muestran en el Cuadro 3 (FAO, 2000).

Cuadro 2. Fotosíntesis máxima (Pm) kg ha⁻¹ h⁻¹ de CH₂O, como función de temperatura (T) media (°C) del ciclo para el cultivo de cebada (FAO, 2000).

T	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Pm	5	15	20	20	15	5	0	0	0

Cuadro 3. Niveles de inversión, IAF y Hi para el cultivo de cebada (FAO, 2000).

Cultivo	Ciclo del cultivo	Grupo del cultivo	Nivel de inversión					
			Alto		Medio		Bajo	
			IAF max	Hi	IAF max	Hi	IAF max	Hi
Cebada	100 días	C3	3.5	0.4	2.5	0.3	1.5	0.2

3) comparación del resultado de Bn y rendimiento estimado por región y genotipo vs rendimiento experimental. Con el esquema de cálculo del libro de Excel se estima el rendimiento con base a la duración del ciclo fenológico, IAF y Hi de cada genotipo. Se realiza la comparación de rendimientos estimados y experimentales por medio de una regresión. Asimismo, se obtiene un cociente por genotipo

y región, como factor de ajuste para reducir la variación (porcentaje de sobreestimación y subestimación) entre rendimientos estimados y experimentales. Finalmente, se busca un cociente con base al promedio de la metodología de la FAO y promedio de rendimientos estimados, para obtener una relación con la DsE que permita estimar rendimientos en una etapa anticipada a la cosecha (en el espigamiento).

Cuadro 4. Variables determinadas en los experimentos de campo en tres localidades de Hidalgo y tres genotipos de cebada establecidos bajo temporal, 2006.

Región	Localidad	Variedad	Bn	DsE	IAF [§]	Hi	Rendimiento
			(kg ha ⁻¹)	(núm. ha ⁻¹)			(kg ha ⁻¹)
1	Almoloya	Esmeralda	10990	3976676	3.32	0.406	4462
		Adabella	11485	4641399	4.32	0.414	4755
		M - 152 A	11707	4139942	3.83	0.42	4917
2	Apan	Esmeralda	7913	3853061	2.43	0.401	3173
		Adabella	7729	3926531	2.65	0.412	3184
		M - 152 A	7844	3983673	2.37	0.417	3271
3	Villa de Tezontepec	Esmeralda	5906	3689796	2.72	0.406	2398
		Adabella	6340	3567347	3.14	0.382	2422
		M - 152 A	6426	3551020	2.90	0.426	2738

Donde: Bn=biomasa neta; DsE=densidad de espigas; IAF=índice de área foliar; Hi=índice de cosecha; [§]variable estimada con IAF=(Bn de hojas) (AFE/10 000); AFE=área foliar específica (25 m² kg⁻¹ de hoja para cebada).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera etapa de la metodología utilizada, se obtuvieron los componentes del rendimiento evaluados en campo, en peso seco (Cuadro 4). Es conveniente hacer notar que los valores de IAF y Bn fueron mayores en la variedad Adabella, pero en la región 1 se obtuvo el mayor en rendimiento de grano. El genotipo de mayor rendimiento

fue M - 152 A, debido al alto valor de Hi. Las diferencias genéticas de los cultivares observada en campo fue determinante en los resultados obtenidos, como lo afirman Akcura *et al.* (2005).

Para aplicar la metodología propuesta por la FAO, es necesario conocer la duración del ciclo del cultivo; que se desarrolló en el ciclo primavera - verano de 2006 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Fenología de la cebada bajo temporal en tres localidades del estado de Hidalgo (primavera-verano, 2006).

Región	Localidad	Genotipo	Fecha de siembra	Emergencia	Madurez fisiológica
1	Almoloya	Esmeralda	5 jul.	12 jul.	23 oct.
		Adabella		12 jul.	27 oct.
		M - 152 A		12 jul.	20 oct.
2	Apan	Esmeralda	16 jun.	24 jun.	27 sept.
		Adabella		24 jun.	2 oct.
		M - 152 A		24 jun.	24 sept.
3	Villa de Tezontepec	Esmeralda	29 jun.	6 jul.	8 oct.
		Adabella		6 jul.	13 oct.
		M - 152 A		6 jul.	3 oct.

El ciclo varió de acuerdo con cada genotipo; la variedad Esmeralda presenta una duración de 100 hasta 110 días, la variedad Adabella desde 105 hasta 114 días, y la línea experimental M - 152A de 95 a 107 días, debido a las diferentes altitudes de las localidades, las cuales variaron de 2 355 a 2 730 m. Los datos climatológicos usados para estimar rendimientos por el método de la FAO, fueron promedios mensuales de cada localidad (Almoloya, de julio a octubre; Apan y Villa de Tezontepec, de junio a octubre) de la emergencia a la madurez fisiológica de cada genotipo.

Cálculo de la tasa bruta o gruesa (bgm) de producción de biomasa, biomasa neta (Bn) y rendimiento de grano de localidad

Se determinó el valor promedio para el ciclo del cultivo de: la radiación global (Rg); radiación teórica (R_A); radiación fotosintéticamente activa (Ac); la producción fotosintética para días despejados (bc) y para días nublados (bo); y la temperatura media. Con base a la temperatura media del ciclo se determinó la fotosíntesis máxima (Pm) $\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de CH_2O (Cuadros 6, 9 y 12). Se obtuvo la bgm con base a Ac, bc, bo, Rg y Pm de cada localidad en estudio (Cuadros 7, 10 y 13).

Cuadro 6. Resultados de Rg, R_A , Ac, bc, bo y Pm ciclo julio-octubre, Almoloya, Hidalgo, 2006. (Latitud norte 19° 45' 14.4").

Variable	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Promedio
Rg	509.538	471.229	467.556	450.402	475
R_A	932	909	849	754	861
Ac	388	379	354	314	359
bc	472	460	430	382	436
bo	249	243	227	201	230
T	12.1	12.1	12.3	12.1	12.2*

Donde: Rg=radiación global ($\text{cal cm}^{-2} \text{día}^{-1}$); T=temperatura media (°C), obtenida de la estación agroclimática automatizada de Almoloya, Hidalgo; R_A =radiación teórica ($\text{cal cm}^{-2} \text{día}^{-1}$), obtenida de Torres (1983); Ac=0.4166 R_A ; bc=0.5063 R_A ; bo=0.2671 R_A ; *Pm < 20.

Cuadro 7. Cálculo de la tasa máxima de producción (bgm) de cebada de temporal Almoloya, Hidalgo, 2006.

Ac	bc	bo	Rg	F	x	bgm
359	436	230	475	0.422896845	15	307.89

Donde: $F = (Ac - 0.5Rg)/(0.8Ac)$; $bgm = F(bo)((100-(x/2))/100) + (1-F)(bc)((100-x)/100)$; $x = |(Pm-20)/20|(100)$; $(Pm < 20)$.

Cuadro 8. Cálculo de Biomasa neta (Bn) y rendimiento de cebada de temporal Almoloya, Hidalgo, 2006.

IAF	Hi	bgm	L	Ct	Bn	Rendimiento (kg ha ⁻¹) [*]
3.5	0.4	307.89	0.83483599	0.00209445	9496.44264	3850
2.5	0.3	307.89	0.7025755	0.00209445	7991.95058	2430
1.5	0.2	307.89	0.5017802	0.00209445	5707.85992	1735

Donde: IAF=índice de área foliar (Cuadro 3); Hi=índice de cosecha (Cuadro 3); bgm=tasa máxima de producción (Cuadro 7); L=factor de corrección cuando IAF < 5; $L = 0.3424 + 0.9051(\log_{10}IAF)$; Ct=coeficiente de respiración; $Ct = C_{30}(0.044 + 0.0019T + 0.001T^2)$; $C_{30} = 0.0108$ para no leguminosas; Bn=biomasa neta; $Bn = (0.36bgm(L))/(1/N) + (0.25Ct)$; N=días de ciclo del cultivo; *rendimiento=(Bn)(Hi).

Cuadro 9. Resultados de Rg, R_A, Ac, bc, bo y Pm ciclo junio-septiembre, Apan, Hidalgo, 2006. (Latitud norte 19° 41' 16.6").

Variable	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Promedio
Rg	585.9	532.0	521.9	495.0	534
R _A	933	931	909	850	906
Ac	389	388	379	354	377
bc	472	471	460	430	459
bo	249	249	243	227	242
T	14.1	14.2	14.0	14.1	14.1*

Donde: Rg=radiación global (cal cm⁻² día⁻¹); T=temperatura media (°C), obtenida de la estación agroclimática automatizada de Apan, Hidalgo; R_A=radiación teórica (cal cm⁻² día⁻¹), obtenida de Torres (1983); Ac=0.4166R_A; bc=0.5063R_A; bo=0.2671R_A; *Pm < 20.

Cuadro 10. Cálculo de la tasa máxima de producción (bgm) de cebada de temporal Apan, Hidalgo, 2006.

Ac	bc	bo	Rg	F	x	bgm
377	459	242	534	0.365998361	5	363.33

Donde: $F = (Ac - 0.5Rg)/(0.8Ac)$; $bgm = F(bo)((100-(x/2))/100) + (1-F)(bc)((100-x)/100)$; $x = |(Pm-20)/20|(100)$; $(Pm < 20)$.

La bgm, se utilizó para el cálculo de la Bn y el rendimiento de grano (Cuadro 8, 11 y 14). El IAF se estimó a partir de la biomasa neta (Bn) de las hojas y el área foliar específica (AFE) para cebada, el cual es de 25 m² kg⁻¹ de hoja seca (FAO, 2000); el Hi, se obtuvo al dividir la Bn del grano entre la Bn total;

y el rendimiento de grano, se calculó al multiplicar la Bn total por el Hi. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 15 por localidad y genotipo. Con estos resultados, se estimó la Bn total y los rendimientos de grano por el método FAO y se compararon con los rendimientos experimentales (Cuadro 16).

Cuadro 11. Cálculo de Biomasa neta (Bn) y rendimiento de cebada de temporal Apan, Hidalgo, 2006.

IAF	Hi	bgm	L	Ct	Bn	Rendimiento (kg ha ⁻¹) [*]
3.5	0.4	363.33	0.83483599	0.00259598	10719,7292	4288
2.5	0.3	363.33	0.7025755	0.00259598	9021,43562	2706
1.5	0.2	363.33	0.5017802	0.00259598	6443,11928	1289

Donde: IAF= índice de área foliar (Cuadro 3); Hi= índice de cosecha (Cuadro 3); bgm= tasa máxima de producción (Cuadro 10); L= factor de corrección cuando IAF < 5.5; L= $0.3424 + 0.9051(\log_{10} \text{IAF})$; Ct=coeficiente de respiración; Ct= $C_{30}(0.044 + 0.0019T + 0.001T^2)$; $C_{30} = 0.0108$ para no leguminosas; Bn= biomasa neta; Bn= $(0.36 \text{bgm}(L)) / ((1/N) + (0.25 \text{Ct}))$; N= días de ciclo del cultivo; *rendimiento= (Bn)(Hi).

Cuadro 12. Resultados de Rg, R_A, Ac, bc, bo y Pm ciclo julio-octubre, Villa de Tezontepec, Hidalgo, 2006. (Latitud norte 19° 54' 12.2").

Variable	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Promedio
Rg	585.4	551.6	515.5	513.3	541
R _A	931	909	850	754	861
Ac	388	379	354	314	359
bc	471	460	430	382	436
bo	249	243	227	201	230
T	15.6	15.5	15.7	15	15.5*

Donde: Rg=radiación global (cal cm⁻² día⁻¹); T=temperatura media (°C), obtenida de la estación agroclimática automatizada de Tolcayuca, Hidalgo; R_A=radiación teórica (cal cm⁻² día⁻¹), obtenida de Torres (1983); Ac=0.4166R_A; bc=0.5063R_A; bo=0.2671R_A; *Pm=20.

Cuadro 13. Cálculo de tasa máxima de producción (bgm) de cebada de temporal, Villa de Tezontepec, Hidalgo, 2006.

Ac	bc	bo	Rg	F	Pm	bgm
359	436	230	541	0.306556366	20	373

Donde: F= (Ac - 0.5Rg)/(0.8 Ac); bgm= F(bo) + (1 - F)(bc); (Pm= 20).

Cuadro 14. Cálculo de Biomasa neta (Bn) y rendimiento de cebada de temporal, Villa de Tezontepec, Hidalgo, 2006.

IAF	Hi	bgm	L	Ct	Bn	Rendimiento (kg ha ⁻¹) [*]
3.5	0.4	373	0.83483599	0.00308489	10401.6286	4161
2.5	0.3	373	0.7025755	0.00308489	8753.73069	2626
1.5	0.2	373	0.5017802	0.00308489	6443.11928	1250

Donde: IAF= índice de área foliar (Cuadro 3); Hi= índice de cosecha (Cuadro 3); bgm= tasa máxima de producción (Cuadro 13); L= factor de corrección cuando IAF < 5.5; L= $0.3424 + 0.9051(\log_{10} \text{IAF})$; Ct=coeficiente de respiración; Ct= $C_{30}(0.044 + 0.0019T + 0.001T^2)$; $C_{30} = 0.0108$ para no leguminosas; Bn= biomasa neta; Bn= $(0.36 \text{bgm}(L)) / ((1/N) + (0.25 \text{Ct}))$; N= días de ciclo del cultivo; *rendimiento= (Bn)(Hi).

Cuadro 15. Cálculo de IAF, Hi y rendimiento de grano de cebada de temporal a partir de los datos experimentales de cada localidad en estudio, 2006.

Localidad	Genotipo	Bn total (g)	Bn total [†] (kg ha ⁻¹)	Bn hoja [†] (g)	Bn hoja (kg ha ⁻¹)	IAF [¶]	Hi [†]	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Almoloya	Esmeralda	115.39	10990	16.27	1328	3.32	0.406	4462
	Adabella	140.69	11485	21.16	1727	4.32	0.414	4755
	M - 152 A	143.41	11707	18.77	1532	3.83	0.420	4917
Apan	Esmeralda	96.93	7913	10.19	970	2.43	0.401	3173
	Adabella	94.68	7729	11.12	1059	2.65	0.412	3184
	M - 152 A	96.09	7844	9.96	949	2.37	0.417	3271
Villa de Tezontepec	Esmeralda	72.35	5906	13.31	1086	2.72	0.406	2398
	Adabella	77.66	6340	15.37	1255	3.14	0.382	2422
	M - 152 A	78.72	6426	14.21	1160	2.90	0.426	2738

Donde: [†] resultado de los experimentos establecidos en campo; [¶] variable estimada con IAF= (Bn de hojas)(AFE/10 000); AFE= área foliar específica (25 m² kg⁻¹); rendimiento=(Bn)(Hi).

Cuadro 16. Comparación de biomasa neta (Bn) y rendimiento de grano estimada vs rendimiento experimental de cebada de temporal en tres localidades, 2006.

Región	Localidad	Variedad	Bn	Bn	Rendimiento	Rendimiento
			experimental	estimado	experimental	estimado
1	Almoloya	Esmeralda	10990	9385	4462	3810
		Adabella	11485	10941	4755	4530
		M-152 A	11707	9774	4917	4105
2	Apan	Esmeralda	7913	8720	3173	3497
		Adabella	7729	9564	3184	3940
		M-152 A	7844	8204	3271	3421
3	Villa de Tezontepec	Esmeralda	5906	9167	2398	3722
		Adabella	6340	10327	2422	3945
		M-152 A	6426	9039	2738	3851

Es de importancia señalar que la región 1, la metodología de la FAO, subestima los rendimientos y la biomasa neta; mientras que las regiones 2 y 3, los sobre estima; sólo la región 2 se observa que se estima con menor variación. El método FAO no alcanza a ser sensible a los cambios de las regiones edafoclimáticas y a la diferencia genética de los cultivares, sin embargo, a nivel promedio su estimación resulta razonable. Debido a estos resultados, se procedió a realizar una corrección a los rendimientos para obtener un factor de ajuste por región y genotipo, y así determinar la variación existente. Además, se realizó una media general para observar su variación y determinar su ajuste a nivel promedio (Cuadro 17).

Las diferencias entre los rendimientos estimados y experimentales, varían de 4.97% hasta 19.78% cuando se subestima (región 1) y de 4.39% hasta 38.61% cuando se sobreestima (región 2 y 3). Al realizar el promedio general, la variación es baja (10.06%) y se puede considerar aceptable.

De acuerdo con los resultados, podemos señalar que el promedio general es aceptable, pero no mide o no es sensible a los cambios edafoclimáticos y de características genéticas de los cultivares de cebada. Se proponen los factores de ajuste para que estos permitan distinguir la

productividad de cada región y de cada genotipo, de manera que al ser multiplicados por este factor en cada región y genotipo sean ajustados los rendimientos.

Se buscó un factor de ajuste a los rendimientos que se relacionara con variables para estimar los rendimientos de manera anticipada, y que se fundamenten con el uso de la información que se generó en los experimentos

establecidos y el ajuste de la metodología de la FAO. Se utilizaron dos factores de ajuste: a) el promedio de los resultados teóricos del procedimiento de la FAO, del nivel de inversión alto ($IAF = 3.5$ y $Hi = 0.4$) de cadalocalidad en estudio; $3850, 4288$ y 4161 kg ha^{-1} que da un promedio de 4100 kg ha^{-1} ; y b) el promedio de los rendimientos estimados. Ambos se correlacionaron con la DsE, que es una variable que puede ser evaluada antes de la cosecha (Cuadro 18).

Cuadro 17. Ajuste de rendimientos estimados, obtención del factor de ajuste y porcentaje de variación de las regiones y genotipos utilizados.

Región	Localidad	Genotipo	Rendimiento (kg ha^{-1})		Factor de ajuste	Variación (%)
			Experimental	Estimado		
1	Almoloya	Esmralda	4462	3810	1.1709	17.09
		Adabella	4755	4530	1.0497	4.97
		M - 152 A	4917	4105	1.1978	19.78
2	Apan	Esmralda	3173	3497	0.9073	-9.27
		Adabella	3184	3940	0.8082	-19.18
		M - 152 A	3271	3421	0.9561	-4.39
3	Villa de Tezontepec	Esmralda	2398	3722	0.6443	-35.57
		Adabella	2422	3945	0.6139	-38.61
		M - 152 A	2738	3851	0.7109	-28.91
	Promedio		3480	3869	0.8994	-10.06

Cuadro 18. Factores de ajuste obtenidos con promedios de FAO, y rendimientos estimados y la DsE obtenida en las parcelas experimentales de tres localidades y tres genotipos de cebada de temporal.

Localidad	Genotipo	Rendimiento (kg ha^{-1})		Factor 1 [†]	Factor 2 [¶]	DsE ha^{-1} (millones)
		Experimental	Estimado			
Almoloya	Esmralda	4462	3810	1.09	1.15	3.98
	Adabella	4755	4530	1.16	1.23	4.64
	M - 152 A	4917	4105	1.20	1.27	4.14
Apan	Esmralda	3173	3497	0.77	0.82	3.85
	Adabella	3184	3940	0.78	0.82	3.93
	M - 152 A	3271	3421	0.80	0.85	3.98
Villa de	Esmralda	2398	3722	0.58	0.62	3.69
Tezontepec	Adabella	2422	3945	0.59	0.63	3.57
	M - 152 A	2738	3851	0.67	0.71	3.55
Promedio		3480	3869	0.85	0.90	3.93

Donde: [†] calculado con base en el rendimiento experimental entre la media de 4100 kg ha^{-1} ; [¶] estimado con base en el rendimiento experimental entre la media de los rendimientos estimados de 3869 kg ha^{-1} .

Los resultados de la comparación entre los factores de ajuste obtenidos y la DsE, se muestran en la Figura 1 y la Figura 2, en donde se observa que los dos factores ajustan de manera similar y con igual coeficiente de regresión, lo que permite utilizar cualquiera de los dos para la predicción de rendimientos durante el espigamiento, etapa en que se puede determinar la DsE de manera precisa. Sin embargo, para hacer uso del segundo, es necesario establecer experimentos de campo y obtener datos de Bn de la hoja y total; esto provoca un costo mayor que el utilizar la media de los rendimientos teóricos que se obtienen de la metodología de la FAO.

Se recomienda una mayor exploración del ámbito de rendimientos de cebada en el estado, para aumentar la precisión y disminuir el sesgo de modelo para estimar rendimiento en cebada.

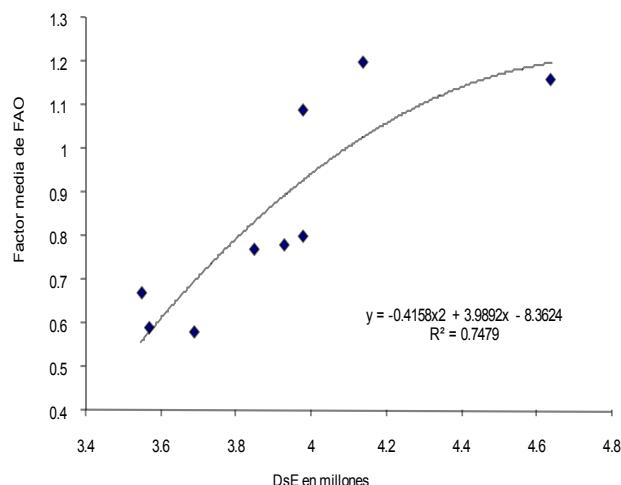


Figura 1. Modelo de regresión entre el factor de ajuste del método de la FAO y la DsE.

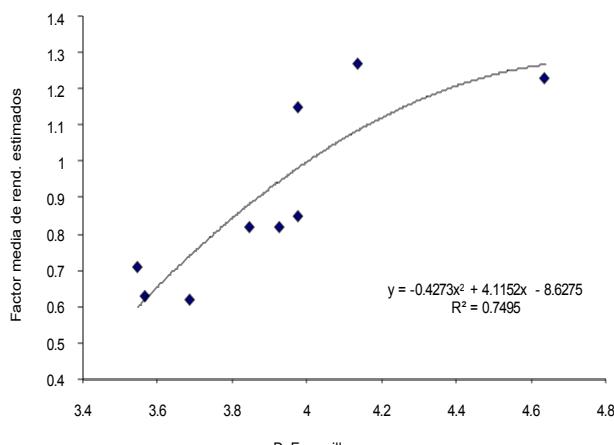


Figura 2. Modelo de regresión entre el factor de ajuste de la media de los rendimientos estimados y la DsE.

CONCLUSIONES

El método FAO es una herramienta que sirve para estimar el rendimiento promedio del cultivo de cebada temporal a nivel de macro región, con limitaciones para establecer los diferentes potenciales de rendimiento en las regiones del área de estudio.

Es necesario calibrar o ajustar el método FAO, para una mejor estimación de rendimiento de cebada temporal, misma que debe de realizarse con un mayor número de experimentos de campo y parcelas comerciales, de manera que se permita captar la variación del rendimiento en las diferentes regiones del estado donde se siembra este cultivo.

El método FAO en el estado de Hidalgo subestima en las regiones de alto potencial el rendimiento de cebada (región 1, Almoloya) y sobreestima el rendimiento en las otras regiones 2 (Apan) y 3 (Villa de Tezontepec).

El ajuste a los rendimientos derivados para la metodología de la FAO, puede ser utilizado de manera aceptable, para estimar rendimientos al obtener la DsE en campo (espigamiento).

LITERATURA CITADA

- Akcura, M.; Cerl, S.; Taner, S.; Kaya, Y.; Oser, E. and Ayrancı, R. 2005. Grain yield stability of winter oat (*Avena sativa* L.) cultivars in the central Anatolian region of Turkey. *J. Central European Agric* 3:203-210.
- Barrales, L. V.; Peña, R. I. y Fernández-de la Reguera, B. P. 2004. Validación de modelos: un enfoque aplicado. *Agric. Téc. (Chile)* 64:6-16.
- Benmoussa, M. and Achouch, A. 2005. Effect water stress on yield and its components of some cereals in Algeria. *J. Central European Agric* 4:427-434.
- Castañeda, M. C. S.; López, C. C.; Molina, M. J.; Colinas, L. T. B. y Livera, H. A. 2004. Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:167-165.
- Castellaro, G. G. y Squella, N. F. 2006. Modelo simple de simulación para la estimación del crecimiento, fenología y balance hídrico de praderas anuales de clima mediterráneo. *Agric. Téc. (Chile)* 66:271-282.

- Gómez, M. R.; Turrent, F. A.; Ortiz, S. C. A. y Peña, O. B. 2001. Productividad en cebada maltera. I. Uso de factoriales 2^e en el estudio integrado de factores controlables e incontrolables. *Agric. Téc. Méx.* 27:84-94.
- Gómez, M. R.; Turrent, F. A.; Ortiz, S. C. A. y Peña, O. B. 2001. Productividad en cebada maltera. II. Análisis de las interacciones de seis factores de la producción. *Agric. Téc. Méx.* 27:95-105.
- Gómez, M. R.; Gómez, C. J. L. y Tiscareño, L. M. 2003. Predicción de rendimientos de maíz de riego en el Valle del Mezquital, Hidalgo. In: Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura Ed. Alba, A. A., L. Reyes M. y M. Tiscareño L. Aguascalientes, Aguascalientes, México. 3 y 4 de junio de 2003.
- Loke, Zs. and Soós, G. 2002. Determination of leaf area and plant cover by using digital image processing. *J. Central European Agric* 4:343-352.
- Ortiz, S. C. A.; Gutiérrez, C. M. C. y Nieves, F. J. 2005. Estimación de rendimientos de maíz con el método FAO en el ejido de Atenco, Estado de México. *Rev. Geografía Agríc.* 35:57-65.
- Ovalle, C. M.; Pozo, L. A. del; Arredondo, S. S. y Cavaría, M. J. 2005. Crecimiento y producción de nuevas leguminosas forrajeras anuales en la zona mediterránea de Chile. I. Comportamiento de las especies en la Cordillera Andina. *Agric. Téc. (Chile)* 65:35-47.
- Theo, C. C.; Benjamin, E. and Okechukwu, N. 2005. Relation between global radiation and food production in a humid tropical climate of West Africa. *J. Central European Agric.* 2:179-184.
- Tinoco, A. C. A.; Tiscareño, L. M. y Baéz, G. A. 2003. Predicción de cosechas de maíz: experiencias generadas en el sur de Veracruz, México. In: Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura. Ed. Alba, A. A., L. Reyes M. y M. Tiscareño L. Aguascalientes, Aguascalientes, México 3 y 4 de junio de 2003.
- Torres, B. E.; Mejía, S. E.; Cortés, B. J.; Palacios, V. E. y Exebio, G. A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* 39:481-490.