



Productividad, estabilidad y adaptabilidad de cultivares de maíz forrajero en Galicia

Presentamos los resultados de nuestro estudio, cuyo objetivo fue evaluar la productividad, adaptabilidad y estabilidad de la producción de materia seca de tres cultivares de maíz forrajero (XU1-200, FAO-200; XU2-300, FAO-300 y XU3-400, FAO-400) durante tres años (2014, 2015 y 2016) en cuatro zonas de Galicia, usando el método MHPRVG.

J.A. Oliveira¹, M.J. Bande²

¹Área de Producción Vegetal, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo (Asturias)

²Departamento de Pastos y Cultivos, Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM)- Agencia Gallega de Calidad Alimentaria (Agacal), Xunta de Galicia (Galicia)

INTRODUCCIÓN

La producción española de maíz forrajero se concentra en el norte de España. Galicia, Asturias y Cantabria son las principales regiones productoras con 73.836 ha, 7.033 ha y 4.610 ha, respectivamente (MAPA, 2023). Estas tres regiones representan el 89 % de la superficie española de maíz forrajero.

Uno de los factores estructurales limitantes para aumentar la rentabilidad de las explotaciones ganaderas del norte de España es la escasa base territorial disponible para la produc-

ción de forrajes. Este hecho, unido a la irregularidad estacional de la producción, ha llevado a muchos ganaderos a adoptar estrategias de intensificación de la producción forrajera. En la actualidad, estas explotaciones mantienen la tendencia creciente hacia el uso de maíz forrajero conservado en forma de ensilado, ya que la planta entera de maíz se considera una materia prima ideal para ensilar por su alta producción de materia seca de alto valor nutritivo, rápida recolección, no requerir ningún tratamiento previo para ser

ensilado y porque es fácil de integrar en sistemas de alimentación *unifeed*. Centrándonos en la alimentación de rumiantes, el ensilado de maíz forrajero constituye una mezcla única de grano y fibra digestible de gran utilidad en nutrición animal (Martínez-Fernández *et al.*, 2021).

En 1999 y en colaboración con empresas productoras de semillas, se inició en Galicia un proceso de evaluación de cultivares comerciales de maíz híbrido para ensilado por parte del Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM) y,



▶ A MAYOR ESTABILIDAD Y ADAPTABILIDAD GENÉTICA DE LOS CULTIVARES, MENOR INTERACCIÓN GENOTIPO X AMBIENTE (GxE)



desde entonces, se viene realizando año tras año en cuatro zonas de Galicia (Bande, 2023). Debido a la alta variación interanual de los resultados a causa de la climatología (temperaturas, precipitaciones, etc.), es importante disponer de datos de más de un año para caracterizar agronómicamente un cultivar.

Los modelos de cultivos basados en procesos (funcionales) son excelentes herramientas para estudios que implican la cuantificación de los efectos de las prácticas de manejo, la genética, el suelo y el clima sobre el rendimiento y la fenología de los cultivos (Addiscott y Wagenet, 1985). En maíz forrajero, Oliveira *et al.* (2023) iniciaron la adaptación del modelo CSM-CERES-Maize del paquete informático del Sistema de Apoyo a las Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) (Hoo-genboom *et al.*, 2019) para simular el crecimiento y el desarrollo de tres cultivares de maíz forrajero en tres localidades asturianas con diferentes condiciones ambientales.

Uno de los mayores problemas en la selección de genotipos (cultivares)

con una alta productividad en diferentes ambientes (localidades, años) es la interacción genotipo x ambiente (GxE). Los nuevos cultivares, además de tener una buena producción/rendimiento, deberán tener una buena estabilidad (capacidad de comportarse bien en una gran amplitud de condiciones ambientales) y adaptabilidad (capacidad de respuesta a la mejora del ambiente, como por ejemplo al laboreo, abonado, riego, etc.). A mayor estabilidad y adaptabilidad genética de los cultivares, menor interacción GxE.

Varios métodos de análisis de adaptabilidad y estabilidad se han propuesto por diversos autores (Linn y Binns, 1988; Annicchiarico, 1992). Estos métodos asumen que los efectos genotípicos son fijos y, según Resende (2007), esto es algo limitante en el análisis de experimentos no equilibrados (cuando los tratamientos son asignados a un número desigual de unidades experimentales), no ortogonales (cuando cada nivel de un factor no está presente en el experimento en combinación con cada nivel de otro factor y no se pueden

investigar las interacciones) y con heterogeneidad de varianzas (cuando la varianza de los errores no es constante en todas las observaciones realizadas). Por otra parte, en los modelos mixtos (que combinan efectos aleatorios con efectos fijos), la predicción de los valores genotípicos de los genotipos por el Mejor Predictor Lineal Insegado (BLUP) y la estimación de los componentes de la varianza por el Método de Máxima Verosimilitud Residual o Restringida (REML) permiten la predicción de los efectos genéticos (asumidos aleatorios) libres de los efectos fijos del modelo (Henderson, 1975; Piepho *et al.*, 2008). La evaluación de la significación de los efectos aleatorios en los modelos mixtos no se hace con la prueba F del análisis de varianza, sino con la razón de verosimilitud (LRT) que se obtiene en el análisis de desviación (Resende, 2007).

Para la selección simultánea de producción, estabilidad y adaptabilidad en genotipos, Resende (2007) propuso la media armónica del rendimiento relativo (%) de los valores genotípicos estimados (MHPRVG). ▶▶

► UNO DE LOS MAYORES PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS (CULTIVARES) CON UNA ALTA PRODUCTIVIDAD EN DIFERENTES AMBIENTES ES LA INTERACCIÓN GENOTIPO X AMBIENTE (GxE)



Este método se ha probado útil con diferentes cultivos, como es el caso del maíz (Mendes *et al.*, 2012).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la productividad, adaptabilidad y estabilidad de la producción de materia seca de tres cultivares de maíz forrajero (XU1-200, FAO-200; XU2-300, FAO-300 y XU3-400, FAO-400) durante tres años (2014, 2015 y 2016) en cuatro zonas de Galicia, usando el método MHPRVG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Esta evaluación de cultivares de maíz se realizó en ensayos experimentales de campo en cuatro lugares de Galicia: Ribadeo (43,5458, -7,0816, 43 m.s.n.m.), Ordes (43,0432, -8,4458, 300 m.s.n.m.), Deza (43,6995, -8,3192, 400 m.s.n.m.) y Sarria (42,8194, -7,3758, 520 m.s.n.m.) durante los años 2014, 2015 y 2016.

Los suelos de los ensayos en Ribadeo, situado en A Mariña Oriental (nordeste de Lugo); Ordes (centro de A Coruña) y Deza tienen una textura franco-arenosa, siendo el suelo de Ribadeo sobre pizarras, y los de Ordes y Deza, sobre esquistos. En cambio, el suelo de los ensayos de Sarria tiene una textura franco-arcillo-arenosa y son suelos de pizarras.

El sitio experimental de Ribadeo, según la clasificación climática de

Köppen-Geiger (Kottek *et al.*, 2006) pertenece al clima templado húmedo con verano cálido (tipo Cfb). La temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C. La temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C, pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Las lluvias están repartidas a lo largo del año; no hay una estación seca.

En cambio, los otros tres sitios experimentales pertenecen al clima templado lluvioso, con verano seco y cálido (Csb). La temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C y superior a -3 °C. La temperatura media del mes más cálido no llega a los 22 °C, pero se superan los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Las precipitaciones exceden a la evaporación. Se da una disminución considerable de las lluvias en verano, momento que coincide con las altas temperaturas (Arnfield, 2021).

Los datos meteorológicos se obtuvieron de las estaciones meteorológicas más cercanas a los campos experimentales a través de la página web de Meteogalicia (www.meteogalicia.gal) y se presentan en la figura 1.

Cada experimento de campo incluyó la preparación del suelo, la fertilización, la siembra de los cultivares en las parcelas y los tratamientos fitosanitarios.

La siembra se realizó manualmente en las fechas habituales en las cuatro localidades de ensayo.

Los cultivares híbridos utilizados fueron XU1-200 (FAO 200), XU2-300 (FAO 300) y XU3-400 (FAO 400).

Como cultivo de invierno se sembró una mezcla de raigrás italiano con tréboles anuales para realizar un ensilado en primavera.

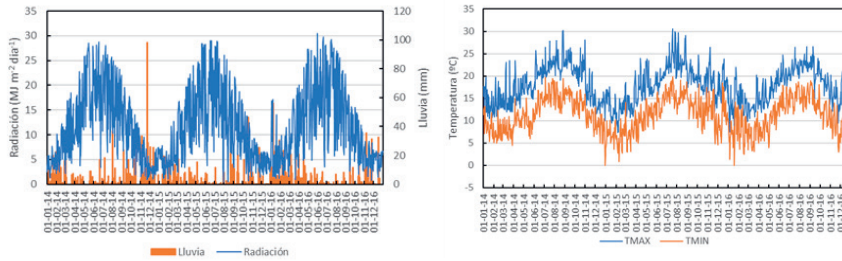
Previamente a la siembra, se aplicaron 200 kg N ha⁻¹ junto con las enmiendas calizas y abonado fosfotásico necesarios según los resultados de los análisis previos del suelo, para compensar las extracciones por el cultivo de invierno en rotación con el maíz.

La densidad de plantación inicial fue de 180.000 plantas ha⁻¹. Cuando las plantas alcanzaron unos 20 cm de altura, se realizó un aclareo para alcanzar la densidad final de 90.000 plantas ha⁻¹.

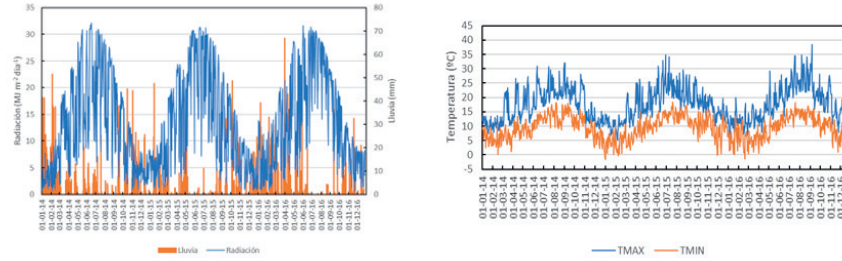
El maíz forrajero para su conservación como ensilado se debe recoger cuando la concentración de materia seca de todo el cultivo se sitúa entre el 30 % y el 35 %, intervalo en el que se alcanza el momento óptimo para producir ensilado (Khan *et al.*, 2015). El momento ideal para ensilar se considera cuando el estado medio del grano de las mazorcas para cada cultivar alcanza el estado de grano pastoso-vítreo (Bande, 2023). La altura de corte de las plantas de maíz fue de 20-25 cm por encima de la superficie del suelo. ►

Figura 1. Datos meteorológicos observados diarios durante los años de evaluación (2014-2016) en las fincas experimentales de Ribadeo, Ordes, Deza y Sarria (Galicia)

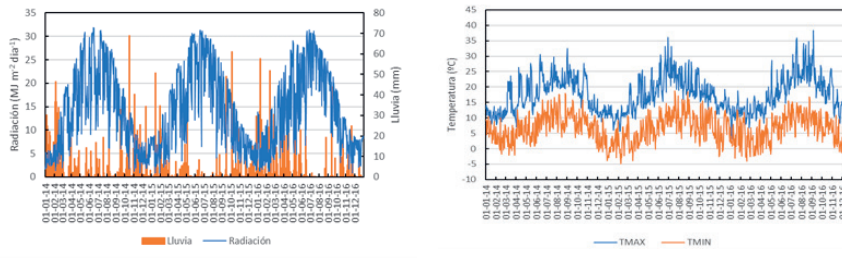
Ribadeo



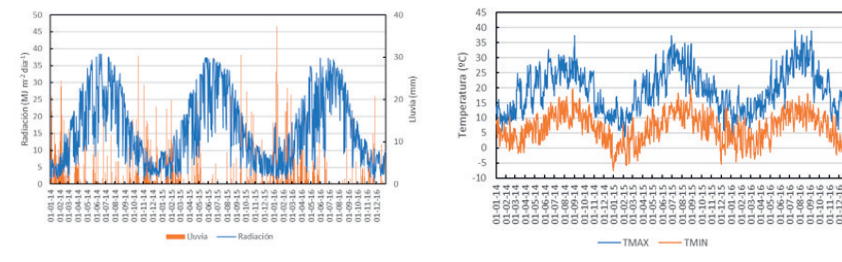
Ordes



Deza



Sarria



Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las subparcelas elementales tenían una superficie de 11,7 m² con tres líneas de 6,5 m de longitud y una separación entre líneas de 0,6 m. El muestreo en el momento de la cosecha se realizó recolectando las plantas en pie existentes en 5 m de longitud de la línea central por parcela. Se separaron al azar diez plantas de las cosechadas en cada parcela. De cada una de estas plantas se separó la mazorca (granos + raquis) y el follaje (tallos + hojas + espigas de las mazorcas).

Las mazorcas y el follaje se picaron independientemente con una picado-

ra eléctrica. Con el material picado por separado, las fracciones de mazorcas y follaje se secaron en una estufa de circulación de aire a una temperatura de 80 °C hasta peso constante para determinar el peso seco de las mazorcas y el del follaje. Posteriormente, las muestras de las dos fracciones se molieron en un molino de martillos “Christy and Norris” 8” a un tamaño de partícula de 1mm, y se enviaron al Laboratorio de Pastos y Cultivos del CIAM donde se determinaron los diferentes parámetros químicos mediante el método NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy: espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano).

En cada lugar experimental se tomaron muestras de suelo para determinar las principales características físicas y químicas del suelo (tabla 1; pág. sig.). En todos los campos experimentales, el contenido inicial de agua del suelo se supuso igual a la capacidad de campo.

El carbono orgánico del suelo (SOC) se calculó a partir de la materia orgánica del suelo (OM) utilizando la siguiente ecuación (Périer y Quimet, 2008): SOC suelo (%) = 0,4724 × OM suelo (%).

Análisis estadístico

La variable considerada en el análisis de productividad, estabilidad y adaptabilidad fue la producción de materia seca en el momento del corte para ensilado (kg MS ha⁻¹).

Los análisis estadísticos se realizaron con el modelo 54 del programa SELEGEN-REML/BLUP (Resende 2007), asumiendo el modelo mixto: $y = Xb + Zg + Wc + e$, donde “y” es el vector de las observaciones de la variable producción de materia seca, “b” es el vector del efecto de la repetición o bloque dentro de los diferentes ambientes (asumido fijo), “g” es el vector del efecto de los genotipos (asumido aleatorio), “c” es el vector del efecto de la interacción GxE (asumido aleatorio) y “e” es el vector del error o residuo (aleatorio). X, Z y W son las matrices de incidencia (compuestas de unos y ceros) para “b”, “g” y “c” respectivamente. Los parámetros genéticos se estimaron mediante el método REML/BLUP. La evaluación de la significación de los efectos aleatorios del modelo se realizó mediante la prueba Chi-cuadrado del análisis de desviación (Resende, 2007).

El efecto ambiente se creó como combinación de las localidades x años, obteniendo 12 ambientes (4 localidades x 3 años).

La media armónica del rendimiento relativo de los valores genotípicos (MHPRVG) se calculó para todos los genotipos según la siguiente expresión propuesta por Resende (2002):

$$MHPRVG = \frac{n}{\sum_j^n \frac{1}{Vg_{ij}}}$$

Donde: n es el número de ambientes donde el genotipo i se evaluó; $Vg_{ij} = u_j + g_i + ge_{ij}$, es el valor genotípico del genotipo i en el ambiente j, expresado como proporción de la

► EL MÉTODO MHPRVG SE MOSTRÓ ADECUADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CULTIVARES DE MAÍZ FORRAJERO CON UNA BUENA PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA, ESTABLE Y CON BUENA ADAPTABILIDAD

Tabla 1. Características del perfil del suelo en las fincas experimentales de Ribadeo, Ordes, Deza y Sarria (Galicia)

	Profundidad	Arcilla	Limo	SOC†	pH	LL	DUL	SAT	BD
	cm	%	%	%		v/v	v/v	v/v	g cm ⁻³
Ribadeo	20	11,2	25,8	3,9	7,1	0,189	0,373	0,532	1,54
	40	18,5	27,4	2,8	6,1	0,189	0,373	0,532	1,54
	60	17,1	16,4	2,8	4,6	0,189	0,373	0,532	1,54
Ordes	20	12,7	11,4	4,9	6,5	0,225	0,408	0,538	1,54
	40	13,2	12,3	4,9	6,0	0,225	0,408	0,538	1,54
	60	19,8	16,1	3,9	6,0	0,225	0,408	0,538	1,54
Deza	20	13,0	19,1	4,5	7,2	0,213	0,400	0,536	1,54
	40	8,6	18,6	4,2	7,1	0,213	0,400	0,536	1,54
	60	7,1	13,6	4,2	7,1	0,213	0,400	0,536	1,60
Sarria	20	9,3	11,4	3,6	6,4	0,171	0,318	0,507	1,60
	40	7,4	12,3	2,7	6,2	0,171	0,318	0,507	1,60
	60	22,2	16,1	1,2	5,7	0,171	0,318	0,507	1,50

†SOC, carbono orgánico del suelo; LL, punto de marchitez permanente; DUL, capacidad de campo; SAT, humedad de saturación; BD, densidad aparente

media de dicho ambiente, donde u_j es la media del ambiente j , g_i el efecto del genotipo i y ge_{ij} el efecto de la interacción entre el genotipo i y el ambiente j .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN
Análisis de desviación

La presencia de interacciones GxE es un reto en mejora genética vegetal, tanto en el proceso de selección como en el de recomendación de cultivares. La evaluación de la interacción GxE trata de explicar el hecho de que el mejor genotipo para un ambiente determinado puede no serlo en otro ambiente diferente (Crossa, 2012).

El análisis de desviación de los efectos aleatorios mostró que la interacción GxE fue significativa al nivel 5 % por la prueba Chi-cuadrado (tabla 2).

Debido a que la interacción GxE fue significativa, esto indicó que hay una variabilidad en la producción de materia seca de los genotipos en los diferentes ambientes. Por lo tanto, parece interesante estudiar la estabilidad y la adaptabilidad de los genotipos con el fin de recomendar los mejores genotipos (cultivares) para todos los ambientes evaluados.

El valor de 13,1 % obtenido para el coeficiente de variación residual (C_{Ve}) en este trabajo indica una buena precisión experimental, lo que es importante para obtener una buena exactitud en la selección o recomendación de genotipos.

El valor de la heredabilidad en

Tabla 2. Valores del análisis de desviación y estimaciones de los componentes de la varianza (método REML): varianza genotípica (V_g), varianza de la interacción genotipo x ambiente (V_{int}), varianza residual (V_e), varianza fenotípica (V_f), heredabilidad en sentido amplio (h²_g), exactitud en la selección de los genotipos (Acgen), correlación genética entre ambientes (rgloc), coeficiente de variación residual (C_{Ve} %) y media general del ensayo (MG) para la producción de materia seca (kg MS ha⁻¹) de tres cultivares de maíz forrajero en 12 ambientes (4 localidades x 3 años) de Galicia

Efecto	Desviación ^a	LRT ^b (Chi-cuadrado)
Genotipo	1.266,4	3,0 ns
Genotipo x Ambiente	1.268,6	5,2 *
Modelo completo	1.263,4	
Parámetros	Estimaciones	
V _g	1.364.865,53	
V _{int}	2.669.856,14	
V _e	6.510.172,96	
V _f	10.544.894,64	
Heredabilidad (h ² _g)	0,13	
Exactitud (Acgen)	0,88	
Correlación genética entre ambientes (rgloc)	0,34	
Coeficiente de variación residual (C _{Ve} %)	13,1	
Media general (MG kg MS ha ⁻¹)	19.484	

^aDesviación del modelo ajustado sin los efectos correspondientes

^bLRT = razón de verosimilitud

* = significativo por la prueba Chi-cuadrado con 1 grado de libertad al 5 % de probabilidad (3,84)

sentido amplio al nivel de parcela individual es bajo, lo cual indica que el ambiente tiene una gran influencia en la expresión fenotípica del carácter producción de materia seca. La mayor contribución al valor fenotípico de la producción de materia seca está asociada a la varianza ambiental (V_e) que representa el 61,7 % de la varianza fenotípica total (V_f), por lo que la contribución de la varianza genotípica (V_g) fue baja.

La varianza de interacción (V_{int}) obtenida en este trabajo representó un 25,3% de la varianza fenotípica

total, lo que se traduce en una baja correlación genética entre ambientes (rgloc=0,34), indicando una baja similitud entre los ambientes evaluados, lo que justifica una evaluación en varias localidades.

La exactitud en la selección de genotipos (Acgen = 0,88) fue alta, lo que indica una buena calidad experimental.

Valores genotípicos estimados (valores BLUP)

Los valores genotípicos estimados (VG = u + g) de cada cultivar considerando todos los ambientes se ►►

obtuvieron mediante una técnica que permite estimar el mérito genético de un genotipo, libre del efecto de la interacción genotipo x ambiente, donde \bar{u} es la media general de todos los ambientes y g el efecto genotípico (Robinson, 1991).

La tabla 3 muestra los cultivares evaluados ordenados por los mejores valores genotípicos para un ambiente medio que representa los 12 ambientes evaluados.

Estabilidad y adaptabilidad de la producción de materia seca

La metodología de los modelos mixtos (Resende, 2016) se usó para la selección simultánea de cultivares basada en la productividad, estabilidad y adaptabilidad.

Se estimó la media armónica del rendimiento relativo de los valores genotípicos (MHPRVG) (tabla 4), que indica la productividad, estabilidad y adaptabilidad esperadas. Esta estimación se puede usar cuando se considera la siembra en diferentes localidades con interacciones GxE. Se deberían seleccionar los cultivares con una MHPRVG mayor o igual a 1 (Torres *et al.*, 2015). La cantidad MHPRVG*MG es el producto de MHPRVG por la media general en todos los ambientes (MG). Los resultados del estudio MHPRVG de adaptabilidad y

estabilidad mostraron que los cultivares XU3-400 y XU3-300 son los mejores debido a su buena producción de materia seca, estabilidad y adaptabilidad (tabla 4).

El índice del comportamiento relativo del valor genotípico de estos dos cultivares es de 1,03 a 1,04 veces mayor que la media general en los 12 ambientes (MG).

CONCLUSIÓN

Los cultivares de maíz forrajero XU3-400 (FAO-400) y XU2-300 (FAO-300) tuvieron un mejor comportamiento que el cultivar XU1-200 (FAO-200) en relación a la producción de materia seca, estabilidad y adaptabilidad.

El método MHPRVG se mostró adecuado para la identificación de cultivares de maíz forrajero con una buena producción de materia seca, estable y con buena adaptabilidad. Además, este método proporciona resultados en las mismas unidades obtenidas en los ensayos agronómicos, lo que puede interpretarse directamente como un valor genotípico relacionado con la producción y los índices de estabilidad y adaptabilidad. ■

Tabla 3. Valores genotípicos estimados (VG en kg MS ha⁻¹) para la producción de materia seca (corte en el momento óptimo para ensilado) de tres cultivares de maíz forrajero en 12 ambientes (4 localidades x 3 años) de Galicia, con sus respectivos intervalos de confianza

Cultivares	VG	Intervalo de confianza
XU3-400	20161	18.565,6-21.756,2
XU2-300	19988	18.392,3-21.582,9
XU1-200	18303	16.707,5-19.898,1

Tabla 4. Estabilidad y adaptabilidad de los valores genotípicos (MHPRVG) y valores genotípicos medios combinando productividad, estabilidad y adaptabilidad (MHPRVG*MG) para producción de materia seca de tres cultivares de maíz forrajero en 12 ambientes (4 localidades x 3 años) en Galicia

Cultivares	MHPRVG	MHPRVG*MG (kg MS ha ⁻¹)
XU3-400	1,04	20.228,54
XU2-300	1,03	20.033,19
XU1-200	0,93	18.046,86

BIBLIOGRAFÍA

Addiscott, T.M., Wagenet, R.J., 1985. Concepts of solute leaching in soils: a review of modeling approaches. *J. Soil Sci.* 36: 411-424.

- Annicchiarico, P., 1992. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in northern Italy. *Journal of Genetics and Plant Breeding*, 46: 269-278.

- Arnfield, A.J., 2021. Koppen climate classification: *Encyclopedia Britannica* 2021. Available: <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>.

- Bande, M.J., 2023. Evaluación de variedades de maíz forrajero en Galicia (1999-2022). *Actualización 2023. Vaca Pinta*, 37: 124-132.

- Crossa, J., 2012. From genotype x environment interaction to gene x environment interaction. *Current Genomics*, 13: 225-244. <http://dx.doi.org/%2010.2174/138920212800543066>

- Henderson, C.R., 1975. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. *Biometrics*, 31: 423-447.

- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Shelia, V., Wilkens, P.W., Singh, U., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I., Moreno, L.P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L.A., G.Y. Tsuji, G.Y., Jones, J.W., 2019. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: pp.173-216 [K.J. Boote, editor] *Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture*. Burleigh

Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom (<http://dx.doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10>).

- Khan, N.A., Peiqiang Y., Mubarak A., Cone, J.W., Hendriks, W.H., 2015. Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *J. Sci. Food Agric.* 95: 238-252.

- Kotteck, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3: 259-263.

- Lin, C.S., Binns, M.R., 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science*, 68: 193-198.

- MAPA, 2023. Encuesta sobre superficies y rendimiento de cultivos (ESYRCE). Resultados Provisionales Nacionales y Autonómicos. Edita Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, 47 p. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/>

- Martínez-Fernández, A., Carballal Samalea, A., Argamentería Gutiérrez, A., De La Roza Delgado, B., 2021. Conservación del maíz forrajero: papel de los aditivos en el ensilado. *Mundo Ganadero*, 299: 20-24.

- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Pacheco, C.A.P., Machado, J.R.A., Meirelles, W.F., da Silva, A.R., Parentoni, S.N., 2012. Adaptability and stability of maize varieties using mixed model methodology. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 12: 111-117.

- Oliveira, J.A., Boote, K.J., Oliveira, F.A.A., Hoogenboom, G., Carballal, A., Martínez-Fernández, A., 2023. Adaptación del modelo CSM-CERES-Maize (DSSAT) para simular la producción de maíz forrajero: variación interanual en Asturias. *Vaca Pinta*, 40: 140-155.

- Périé, C., Quimet, R., 2008. Organic carbon, organic matter, and bulk density relationships in boreal forest soils. *Can J Soil Sci.* 88: 315-325.

- Piepho, H.P., Möhring, J., Melchinger, A.E., Büchse, A., 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*, 161: 209-228.

- Resende, M.D.V., 2002. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perennes. *Embrapa Florestas*, Colombo, Brasil, 975 p.

- Resende, M.D.V., 2007. Software SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computarizada via modelos lineares mistos. *Embrapa Florestas*, Colombo, Brasil, 350 p.

- Resende, M.D.V., 2016. Software Selegen-REML/BLUP: A useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 9: 313-319.

- Robinson, G.K., 1991. That BLUP is a good thing: the estimation of random effects. *Statistical Science*, 6(1): 15-32. <http://dx.doi.org/10.1214/ss/1177011926>

- Torres, F.E., Teodoro, P.E., Sagrilo, E., Cecon, G., Correa, A.M., 2015. Genotype x environment interaction in semiprostrata de cowpea genotypes via mixed models. *Bragantia*, 74: 255-260.