

FACTORES CLIMÁTICOS RELACIONADOS CON LA PRODUCCIÓN FORRAJERA DEL CULTIVO DE MAÍZ EN SECANO EN LA CORNISA CANTÁBRICA

J. BUSQUÉ¹, J. DOLTRA¹, S. JIMÉNEZ¹, G. SALCEDO², D. BÁEZ³, G. FLORES³, A. ARGAMENTERÍA⁴, A. MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ⁴, J.M. MANGADO⁵

¹Centro de Investigación y Formación Agrarias (CIFA). c/Héroes 2 de mayo 27, 39600. Cantabria. ²Dpto. Calidad e Innovación. CIFP “La Granja”, 39792 Heras, Cantabria ³Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo, A Coruña, Spain ⁴Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario, Villaviciosa, Spain ⁵Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias, Villava, Spain.
Correspondencia: juanbusque@cifacantabria.org

RESUMEN

Se han utilizado datos correspondientes a nueve experimentos llevados a cabo en la Cornisa Cantábrica desde 1996 hasta 2014 para analizar el efecto de factores climáticos y ambientales en la producción de maíz forrajero. Tras seleccionar las observaciones con valores del índice de nutrición nitrogenada cercanos a la unidad, se confeccionaron tres tipos de modelos relacionando la producción forrajera con (1) la precipitación acumulada y la integral térmica, (2) factores de humedad y temperatura acumulados basados, respectivamente, en balances hídricos y en el efecto de la temperatura en la fotosíntesis, y (3) los mismos factores de humedad y temperatura, pero calculados para cuatro períodos de 30 días cada uno contados a partir de la siembra. Los modelos más robustos de los dos primeros análisis mostraron compensaciones entre las variables relacionadas con la disponibilidad hídrica y las relativas a la temperatura, pero siendo modelos locales que tampoco lograron representar relaciones biológicas claras. Por el contrario, el tercer análisis produjo un modelo que claramente relaciona de forma positiva la producción con la disponibilidad de agua en el segundo mes del cultivo, revelando que éste es un periodo crítico del ciclo de cultivo del maíz al estrés hídrico en la Cornisa Cantábrica.

Palabras clave: índice de nutrición nitrogenada, precipitación, integral térmica, factor de humedad, factor de temperatura

SUMMARY

We collected and used data from nine field experiments within the Cantabrian fringe between 1996 and 2014 to analyze the effect of climatic factors on the yield of forage maize. After selecting the observations with a nitrogen nutrition index close to one, we constructed three types of models relating forage productivity with (1) accumulated precipitation and degree-days, (2) accumulated humidity and temperature factors estimated through water balances and a simple temperature-photosynthesis function, and (3) the same humidity and temperature factors, but for 30 day periods starting from sowing date. The most robust models of the first two analyses showed water-temperature compensations, but were too local and not sufficiently meaningful from a biological point of view. On the contrary, the third analysis produced a model that positively linked forage yield with water availability in the second month of the crop. These results prove the importance of explicitly considering different growth stages of the crop.

Key words: nitrogen nutrition index, precipitation, degree-days, humidity and temperature factors

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz forrajero en secano es habitual en muchas explotaciones de leche de la Cornisa Cantábrica debido a su gran valor alimenticio, fácil ensilabilidad y buenas condiciones climáticas (Muslera y Ratera, 1984). Sin embargo, existe una variabilidad climática interanual que se traduce en una variabilidad en su productividad forrajera, y en años adversos las bajas producciones obtenidas pueden llegar a no compensar los costes asociados (Mangado, 2012). Conocer qué factores climáticos influyen más en la productividad del cultivo de maíz y cuándo lo hacen, es de gran interés para planificar la toma de decisiones en las explotaciones a medio plazo. Una vía interesante para investigar la influencia del clima regional en la producción de un cultivo es analizar conjuntamente estas relaciones con datos de experimentos realizados en distintas localidades y años, buscando reflejar así la variabilidad climática característica del cultivo. El objetivo de este trabajo es realizar este tipo de análisis estadístico, considerando datos experimentales de producción de maíz forrajero de las dos últimas décadas, realizados en centros de investigación agraria de la Cornisa Cantábrica, desde Galicia hasta Navarra.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se recopilaron datos meteorológicos diarios, precipitación y temperatura media, y de producción forrajera y concentración de nitrógeno en la cosecha de nueve experimentos de cultivo de maíz forrajero en secano, correspondientes a cinco localidades de cuatro Comunidades Autónomas de la Cornisa Cantábrica (Tabla 1). Con el objetivo de buscar la independencia entre observaciones, en cada experimento se promediaron los valores de las repeticiones correspondientes a los mismos tratamientos en el mismo año. De esta manera, se dispuso de 220 observaciones para el análisis, provenientes de 32 combinaciones diferentes de año x experimento.

Tabla 1. Descripción de los experimentos de maíz utilizados en el análisis.

Región	Exp.	ETRS89 UTM	Descripción de los tratamientos	Años	Nº Obs.
Asturias	A1E1	30 302480- 4816460	Maíz-Soja asociados (selección de tratam. sólo de maíz)	1999-2002	3
	A3E1		Maíz en rotación con Raigrás italiano	1996-1998	6
	A4E1	29 737620- 4807640	Maíz bajo sistema convencional o ecológico	2008-2009	4
	A4E2		Maíz sólo o en rotación Triticale-Haboncillos y con distintos tipos de pasto previos; convencional/ ecológico	2007-2009	15
Cantabria	C1E1	30 437600- 4805880	Maíz en rotación con cultivos de cereal-leguminosa	2013-2014	9
	C1E4		Maíz en rotación con 5 cultivos de invierno, con 2 tipos de purín, a 4 dosis diferentes	2007-2008	61
Galicia	G1E1	29 559360- 4787750	Maíz. 4 tipos de fertilización	2008-2010	12
	G2E1		Maíz. Producción no experimental en finca del CIAM	2003-2005	15
Navarra	N1E1	30 609090- 4776196	Maíz. Comparación de variedades. Variables entre años	2003-2014	95

De cara a determinar las observaciones con posibles anomalías nutricionales, se estimó, en primer lugar, el Índice de Nutrición Nitrogenada (*INN*) de todas las observaciones, considerando sus valores de biomasa y concentración de nitrógeno, y la curva de dilución de referencia del maíz (Lemaire *et al.*, 2008).

Con los datos diarios de temperatura media y precipitación, desde la siembra hasta la cosecha del cultivo para cada año y localidad, se calcularon la integral térmica con umbral a 8°C (*IT₈*) y la precipitación acumulada (*P_{ac}*). Con estos mismos datos diarios también se calcularon valores diarios durante la duración del cultivo de un factor de humedad (*FH*) y un factor de temperatura (*FT*), ambos

con valores entre cero y uno. FH mide el estrés hídrico, considerando la evapotranspiración y precipitación, y parámetros de suelo y cultivo asumidos constantes. Su cálculo implica la realización de un balance hídrico diario en el suelo (Allen *et al.*, 2006). FT es un factor reductor de la fotosíntesis por bajas ($< 18^{\circ}\text{C}$) o altas ($> 30^{\circ}\text{C}$) temperaturas medias diarias (Sau *et al.*, 2010). Los valores diarios de FH y FT se agregaron para todo el periodo del cultivo (FH_{ac} y FT_{ac}), y para periodos fijos de 30 días, desde el día de la siembra hasta el día 120 del cultivo (FH_{0-30} , FH_{30-60} , FH_{60-90} , FH_{90-120} y FT_{0-30} , FT_{30-60} , FT_{60-90} , FT_{90-120}).

Se realizaron tres tipos de análisis estadísticos (modelos lineales múltiples) según las variables explicativas de partida utilizadas: (1) IT_8 y P_{ac} , (2) FH_{ac} y FT_{ac} ; y (3) FH y FT de los periodos 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 días. Para los dos primeros tipos de análisis se escogió el mejor de siete modelos de regresión diferentes, considerando en el más complejo las dos variables, sus valores cuadráticos y todas las interacciones lógicas posibles. Se probaron estos modelos para todas las observaciones y también para los distintos experimentos o localizaciones. En el tercer tipo de análisis se consideraron de partida las ocho variables simples y las cuatro localizaciones, eligiendo el mejor modelo mediante la selección del mejor subconjunto (James *et al.*, 2014; librería “leaps” de R) y con el menor error cuadrático medio (o si existían varios modelos con ECM similares, el más parsimonioso). Una vez escogido el mejor modelo simple, se comparó éste con modelos similares añadiendo las mismas covariables en forma cuadrática y sus posibles interacciones. Para evitar sobreajustes, todas las regresiones y análisis de covarianza fueron realizados mediante validación cruzada con 10 particiones de las observaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la relación entre biomasa forrajera y concentración de nitrógeno

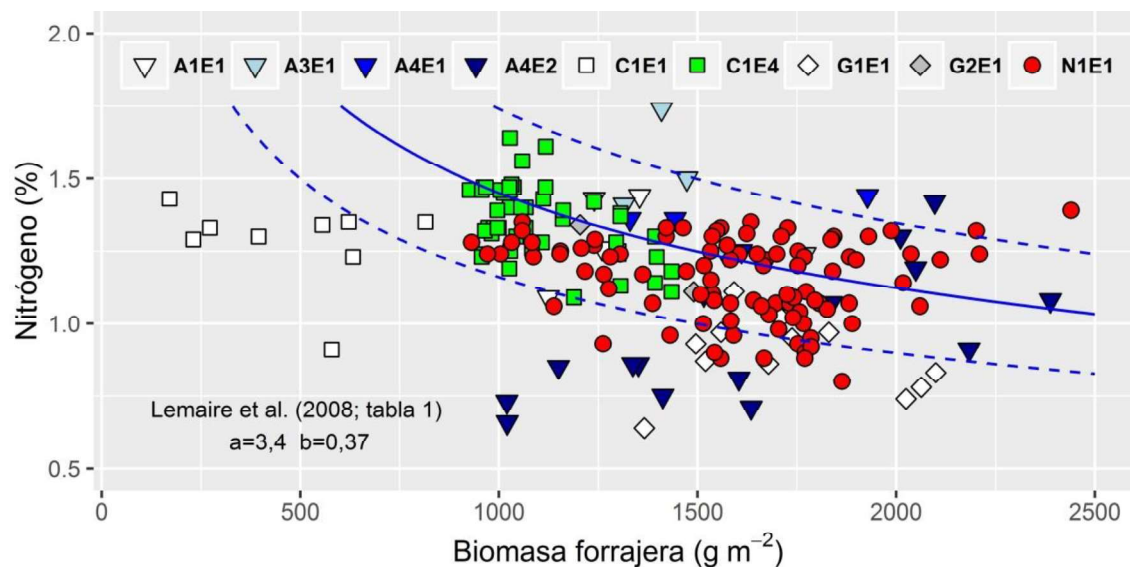


Figura 1. Relación entre la biomasa y la concentración de nitrógeno en experimentos de cultivo de maíz forrajero. Las líneas azules muestran la relación exponencial $\%N_c = a W^b$ (línea continua; $INN=1$) y los valores de INN 0,8 y 1,2 (líneas discontinuas).

El 81% de los datos de cosecha de maíz forrajero se encuentran dentro del rango de valores de INN considerados no limitantes (mayor de 0,8) y sin consumo de nitrógeno de lujo (menor de 1,2; figura 1). Por debajo de $INN=0,8$ se sitúan 37 observaciones correspondientes a tratamientos con baja disponibilidad de nitrógeno en sus experimentos, bien por aportes de fertilizante

aparentemente deficitarios (A1E1, G1E1), o por problemas manifiestos de competencia con adventicias en sistemas ecológicos (A4E2; Martínez *et al.*, 2009). De cara al análisis de los efectos climáticos sobre la producción, y con el objetivo de no mezclar efectos de distinta naturaleza, se prescinde de las observaciones fuera del rango de INN 0,8-1,2.

Análisis del efecto de factores climáticos sobre la producción de maíz forrajero

Análisis 1. Efecto de la precipitación y la integral térmica de todo el ciclo productivo

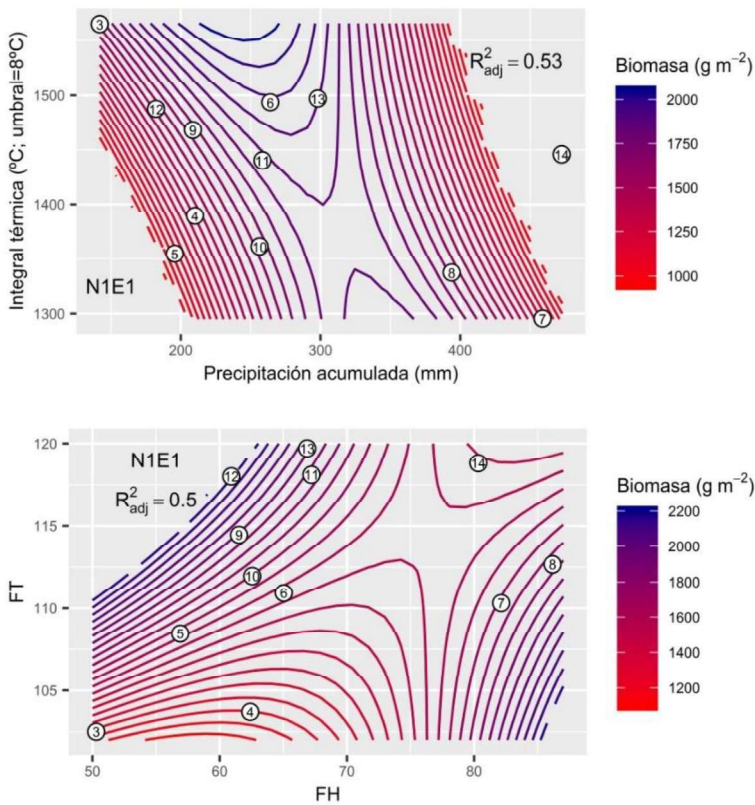


Figura 2. Representación por líneas de contorno de valores iguales de los mejores modelos lineales relacionando la producción de maíz forrajero con: (superior; análisis 1) la precipitación acumulada y la integral térmica desde la siembra a la cosecha, (inferior; análisis 2) los factores humedad y temperatura. Los dos modelos corresponden sólo a las observaciones del experimento N1E1 con $0,8 < INN < 1,2$, y los puntos señalan la localización de las observaciones de cada año (números dentro de los puntos).

La relación más robusta encontrada es la correspondiente a las observaciones del experimento N1E1, que además es el que tiene un mayor número de años muestreados.

$$MS \text{ (g}\cdot\text{m}^{-2}\text{)} = -153\,411(\pm e.s. \ 18\,045.9) + 208,2(\pm 24,07)\cdot IT8 - 0,1(\pm 0,01)\cdot IT8^2 + 49,5(\pm 7,93)\cdot P_{ac} - 0,03(\pm 0,01)\cdot P_{ac}\cdot IT8 \quad R_{adj}^2=0,53 \quad \text{Error Estándar Residual (EER)=198,7 g}\cdot\text{m}^{-2}$$

Este modelo en forma de “silla de montar” (figura 2 superior) muestra las mayores producciones de maíz forrajero a valores intermedios (200-400 mm) del rango de P_{ac} , y con compensaciones entre los valores de P_{ac} y los de $IT8$: a valores de P_{ac} bajos (200 mm) se consiguen producciones altas

cuando la IT_8 es alta (>1450 °C); a valores de P_{ac} altos (400 mm) la producción es alta si la IT_8 es baja (<1350 °C).

Análisis 2. Efecto de los factores de humedad y temperatura de todo el ciclo productivo

En este caso también el modelo más robusto considera sólo las observaciones de N1E1:

$$MS \text{ (g}\cdot\text{m}^{-2}\text{)} = 47\,992(\pm 11\,303.1) - 1\,136,7(\pm 220,16)\cdot FT_{ac} + 6,4(\pm 1,09)\cdot FT_{ac}^2 + 498,1(\pm 83,21)\cdot FH_{ac} - 4,3(\pm 0,74)\cdot FT_{ac}\cdot FH_{ac}$$

$$R_{aj}^2=0,50 \quad EER=206,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$$

De nuevo, el modelo vuelve a mostrar compensaciones entre las variables que indican disponibilidad de agua y de temperaturas adecuadas (figura 2 inferior), con producciones más altas con valores altos de FH_{ac} y bajos de FT_{ac} o viceversa. Las producciones mínimas predichas se dan con valores bajos de FH_{ac} y FT_{ac} .

Análisis 3. Efecto de los factores de Humedad y Temperatura de cada periodo de 30 días

El mejor modelo obtenido consideró todos los experimentos, pero explícitamente diferenciando las observaciones de la localización de Cantabria del resto, y la variable FH_{30-60} . Este modelo alcanzó un R_{aj}^2 de 0,62 y un EER de 0,15 (variable respuesta transformada a su logaritmo neperiano). A partir de este modelo, la inclusión de FH_{30-60} en forma cuadrática y su interacción con el factor localidad de Cantabria mejoró aún más la varianza explicada:

$$\ln(MS) = 7,33(\pm 0,54) - 0,08(\pm 0,05)\cdot FH_{30-60} + 0,003(\pm 0,001)\cdot FH_{30-60}^2 - 0,83(\pm 0,55)\cdot LOC_{NoCant} + 0,16(\pm 0,05)\cdot FH_{30-60}\cdot LOC_{NoCant} - 0,004(\pm 0,001)\cdot FH_{30-60}^2\cdot LOC_{NoCant}$$

$$R_{aj}^2=0,68 \quad EER=0,13$$

Este último modelo (figura 3) pone de relieve la importancia directa de la humedad del suelo en la producción de maíz forrajero en momentos concretos de su desarrollo. Diferentes autores señalan la sensibilidad del cultivo del maíz al estrés hídrico, especialmente en su desarrollo vegetativo y comienzo de la fase reproductiva (Bolaños y Edmedaes, 1996; Aslam *et al.*, 2015; Daryanto *et al.*, 2016). En nuestro caso, la relación obtenida es inequívocamente positiva para el segundo mes del cultivo, que comprende, para todas las variedades contempladas, estas mismas fases fenológicas (www.fao.org/nr/water/cropinfo_maize.html). Este resultado contrasta con lo observado respecto a la humedad para todo el ciclo productivo (FH_{ac} ; figura 2 inferior), con valores contrapuestos e influenciados también por la temperatura (FT_{ac}), a veces de difícil interpretación. Por otro lado, la ausencia de relación entre la producción y los factores FH_{0-30} , FT_{30-60} y FT_{60-90} no se descarta tras el análisis, ya que las observaciones carecen de suficiente variabilidad en estos factores, siempre con valores altos. Por último, las diferencias observadas en la relación entre producción y FH_{30-60} en los experimentos de Cantabria sea posiblemente derivada de no haber considerado la textura del suelo en el cálculo del factor humedad, siendo los suelos de la localidad cántabra muy diferentes a los del resto de localidades experimentales utilizadas.

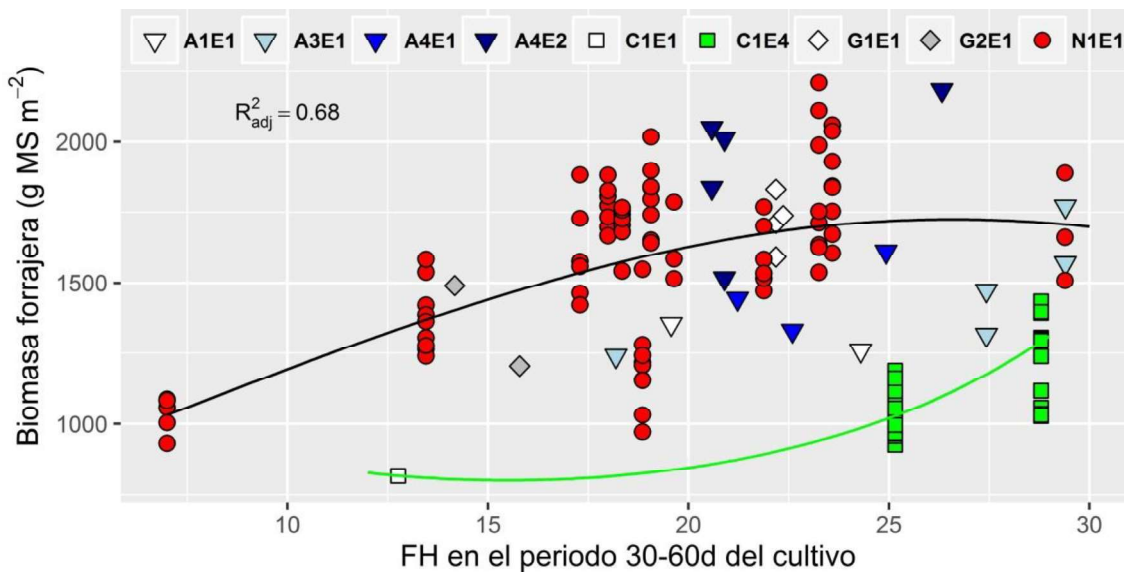


Figura 3. Modelo relacionando las observaciones de producción de maíz forrajero con el factor mensual más influyente (FH_{30-60}). La línea verde señala la regresión significativamente diferente encontrada para las observaciones de la localidad de Cantabria.

CONCLUSIONES

Las variables climáticas agregadas para todo el periodo del cultivo de maíz forrajero no muestran relaciones robustas con su productividad para todos los experimentos del arco cantábrico considerados (análisis 1 y 2). Sin embargo, esta relación aparece cuando las variables climáticas originales se transforman en estimadores de estrés hídrico o disponibilidad de agua para las plantas, considerando periodos sucesivos del desarrollo del cultivo (análisis 3); en concreto, de forma clara, con la disponibilidad de agua en el segundo mes del cultivo. Estos resultados, usados con predicciones meteorológicas estacionales, podrían llegar a ser útiles para la planificación temporal de los cultivos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) a través del proyecto RTA2012-00065-C05-00/03.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Smith M. (2006) *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje nº 56. Roma, Italia.
- Aslam M., Maqbool M.A. y Cengiz R. (2015) *Drought stress in maize (Zea mays L.)*. Springer briefs in Agriculture: Springer.
- Bolaños J. y Edmedaes, G.O. (1996) The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48: 65-80.
- Daryanto S., Wang L. y Jacinthe P.A. (2016) Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS ONE* 11(5): e0156362. doi:10.1371/journal.pone.0156362

James G., Witten D., Hastie T. y Tibshirani R. (2014) *An introduction to statistical learning*. Springer Texts in Statistics. Springer.

Lemaire G., Jeuffroy M.H. y Gastal F. (2008) Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. *European Journal of Agronomy*, 28, 614-624.

Mangado J.M. (2012). Producción de forrajes en el área atlántica: costes económicos, energéticos y huella de carbono. *Navarra Agraria*, 195, 24-28.

Martínez-Martínez A., Pedrol N. y Martínez-Fernández A. (2009) Maíz para ensilar cultivado en sistemas de producción convencional o ecológica. En: Reine R. *et al.* (eds) *La multifuncionalidad de los pastos: producción ganadera sostenible y gestión de los ecosistemas*, pp. 391-397. Huesca, España: Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.

Muslera E. y Ratera C. (1984) *Praderas y forrajes: Producción y aprovechamiento*. Ed. Mundi Prensa, Madrid, España. 702 pp.

Sau F., López-Cedron F.X., Confalone A.E., Lizaso I. (2010) Modelos de simulación del cultivo del maíz: fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos* 40: 117-138.