

EFFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PARA REDUCIR RIESGOS¹

Díaz, R.^{*1}, Rubio, V.², García-Lamothe, A.², Quincke, A.²

¹ Fundación Alberto Boerger, Uruguay, ² INIA, Uruguay
* rdiazrossello@gmail.com

PALABRAS CLAVES: cambio climático, rotaciones, productividad.

INTRODUCCION.

El clima siempre ha sido un factor de riesgo para el sector agropecuario. Aunque los cambios observados en las últimas décadas, tanto en los valores medios como en los extremos (sequías, inundaciones, etc.) agudizaron la problemática, aumentaron la preocupación del sector y pusieron de manifiesto la necesidad de disponer de información de apoyo para enfrentar la nueva situación climática.

El rendimiento de los cultivos de secano en Uruguay se encuentra fuertemente condicionado por la alta variabilidad climática interanual, principalmente en cuanto a precipitaciones y temperatura. Esto representa uno de los grandes desafíos tecnológicos, pues dicha variabilidad se suma a la creciente inestabilidad de precios de insumos y productos en la operación cada vez más intensiva de los sistemas de producción agrícola.

El objetivo de este análisis es caracterizar la interacción entre los rendimientos de estos cultivos y las condiciones climáticas en los períodos críticos de determinación del rendimiento. Asimismo, se intenta comprender la interacción entre estas características y algunas prácticas de manejo de suelos y sanitarias.

Muy variados estudios dan cuenta del cambio climático que viene ocurriendo en el Sureste de Sud América afectando el territorio de Uruguay. Las tendencias más consistentes son: el aumento del promedio de lluvia anual y temperaturas máximas, reducción de las lluvias en el período invernal y aumentos de la variabilidad e intensidad de los eventos de lluvia.

Son muy escasas las fuentes de información que permiten estudiar estos efectos con información sistemática de muchos años que tenga registros de clima, productividad y prácticas de manejo, de modo de identificar los riesgos y las medidas de adaptación relevantes.

MATERIALES Y METODOS

Para este estudio se recurrió a dos fuentes de información en producción de trigo: 1) Un experimento de manejo de suelos de larga duración en La Estanzuela con 50 años de registros donde se contrastan tratamientos de rotación con pasturas y agricultura continua. 2) Un experimento conducido durante 17 años que evaluó los efectos del control de enfermedades y la nutrición nitrogenada sobre la productividad (García A. et al., In press).

Se identificaron las variables bio-meteorológicas del período crítico del cultivo (30 días en el entorno de floración), y los umbrales de éstas, que tuvieron mayor impacto negativo sobre los rendimientos.

Los rendimientos fueron analizados bajo el marco teórico de los modelos lineales mixtos (MLM) (Patterson H., 1971) que permitieron evaluar la significancia estadística de las diferencias en rendimiento de trigo entre secuencias, cultivos fertilizados y no fertilizados y sus interacciones.

Para explorar, describir y predecir relaciones entre rendimientos y variables climáticas, también se usaron árboles de regresión (RT) que permiten evaluar relaciones no lineales con el rendimiento (Breiman L., 1984).

¹ Este artículo reporta para Uruguay parte de un proyecto regional que evaluó información climática y de experimentos de largo plazo para Argentina, Chile, Paraguay, Bolivia, Méjico y Uruguay. Proyecto BID/Fontagro RG-T1654

RESULTADOS Y DISCUSION

Experimento de Larga Duración de La Estanzuela.

Se discute a continuación el análisis del efecto de la variabilidad climática en los rendimientos de trigo del ELD de La Estanzuela. Para caracterizar las tendencias y la variabilidad climática se emplearon los registros de aproximadamente 40 años provenientes de las 5 estaciones meteorológicas del INIA del territorio de Uruguay. Las tendencias de cambio climático promedio explican menos del 10% de la variabilidad total, la variación interanual es la más importante (80%) y el remanente corresponde a cierta tendencia cíclica de escasa relevancia (10%).

El resultado más consistente entre estaciones meteorológicas es el cambio de aumento de las precipitaciones totales y el de las temperatura máximas. Si bien en promedio las temperaturas mínimas aumentan, el comportamiento entre estaciones meteorológicas es variable.

Para visualizar el potencial impacto de las tendencias de cambio se muestran en la tabla 1 las variaciones identificadas para Octubre en que es más frecuente que se presente el período crítico de floración en cereales de invierno. Las temperaturas mínimas y máximas al igual que las precipitaciones evidenciaron tendencias de aumento aunque fueron las precipitaciones las que tuvieron efecto mas significativo.

Tabla 1. Tendencias de Variables Climáticas en el mes crítico de Octubre, para Uruguay entre 1965 y 2011

Período	Temperatura máxima			Temperatura mínima			Precipitación		
	Obs.	Δ °C	%	Obs.	Δ °C	%	Obs.	Δ mm	%
Octubre	21.3	0.25	1.17	13.4	0.78	6.82	122.3	26.65	21.75

Se estimó la tendencia a largo plazo en los rendimientos, para poder descontar el efecto del cambio tecnológico en el período de estudio sobre los rendimientos, por incorporación de nuevas tecnologías en genética, defensivos agrícolas, mecanización etc. La estimación se realizó a través de un análisis de regresión lineal entre los rendimientos anuales y el año de siembra. Se determinó un significativo aumento de 1.7% anual, por lo que los subsiguientes análisis de MLM y árbol de clasificación se realizaron con los valores de rendimiento que tenían descontado este efecto de la tendencia a largo plazo.

a. Análisis mediante Modelos Lineales Mixtos

Este experimento fue analizado anteriormente con MLM y diversos factores de manejo registrados explicaron aproximadamente en 50% de la variabilidad total y se discutió como factor mas importante para explicar el remanente de la variabilidad a la variación climática interanual (Díaz R. et al. 2010). La respuesta a precipitación (PP) no es lineal simple ya que por déficit se deprimen los rendimientos y en exceso aparecen efectos sanitarios que los deprimen. Tres sistemas de manejo del suelo fueron contrastados para evaluar su riesgo productivo ante la variabilidad climática interanual; agricultura continua no fertilizada (ACNF), agricultura continua fertilizada (ACF) y rotación con pasturas (RP). En los cereales de invierno el factor biótico sanitario es extremadamente relevante en la formación de rendimientos. En particular la información que aquí se maneja se obtuvo sin tratamientos sanitarios de fungicidas en la mayor parte de los años. Por lo tanto, el clima afecta los rendimientos no solo directamente sobre el comportamiento fisiológico sino que es muy importante la inducción de enfermedades. El clima cálido y húmedo durante el período crítico del llenado de grano se caracteriza por reducir los rendimientos y claramente por mayor incidencia de enfermedades foliares y en los casos más extremos con la ocurrencia de fusariosis de espiga donde algunos antecedente muestran mermas de rendimiento de hasta 35%. (Díaz de Ackermann M., et al 2011).

Las relaciones lineales de Tm y PP con el rendimiento, fueron estadísticamente significativa ($p < 0.05$). En el modelo lineal mixto ($R^2 = 0.76$) que incluyó los efectos fijos de Sistema (AC_F, AC_NF, RP_F), Tm, PP, explico un 76% de la variación por lo que se redujo a solamente un $\approx 25\%$ el efecto aleatorio de otras variables climáticas y factores no controlados.

Dado que el efecto del sistema fue estadísticamente significativo, se estimó la componente de varianza interanual para cada uno de estos: agricultura continua fertilizada (AC_F), agricultura continua no fertilizada (AC_NF) y rotación con pasturas fertilizada (RP_F) (Tabla 2).

Tabla 2. Variabilidad interanual del efecto de los sistemas de cultivo expresada como porcentaje del rendimiento promedio.

Sistema	Rinde promedio	DE	DER	P(Rinde) ≤ 2321
AC_NF	807	451	56	99
AC_F	2587	709	27	42
RP_F	2997	1042	35	34

AC_NF: Agricultura continua sin fertilizantes; AC_F: Agricultura continua con fertilizantes; RP_F: Rotación de Cultivos y Pasturas fertilizada; DE: Desvío estándar interanual, DER: desviación estándar relativa a la media de rendimientos, P (Rinde): Probabilidad de obtener rendimientos por debajo del umbral económico medido en (kg ha^{-1})

La variabilidad se expresó Desviación Estándar (DE) y como porcentaje del rendimiento promedio obtenido bajo cada sistema Desviación Estándar Relativa (DER)

Ya que los rendimientos obtenidos en el ensayo de rotaciones son a escala comercial, pueden compararse con las medias nacionales en cierto pie de igualdad. De esta manera podemos establecer el rendimiento de indiferencia (también denominado umbral económico) donde el productor no gane ni pierda dinero. Este umbral es difícil de definir con precisión porque los sistemas tienen además costos de producción diferentes. En el caso del contraste entre sistemas con pasturas y sin pasturas los costos pueden ser menores para con pasturas ya que se producen ciertas economías de fertilizantes nitrogenados y control de malezas. No obstante, se lo valora a los efectos de ponderar el riesgo relativo entre sistemas, a través de la frecuencia de años en que no se alcanza un determinado nivel de rendimiento. Con ese propósito el rendimiento de indiferencia empleado aquí es el rendimiento promedio obtenido por los productores en el período de estudio (2321 kg.ha^{-1}). En la tabla 2 se indica el porcentaje de casos en que no se alcanza el rendimiento de indiferencia para cada sistema. Siendo el efecto del sistema estadísticamente significativo, se estimó la componente de riesgo productivo para cada uno de estos: agricultura continua fertilizada (AC_F= 99%), agricultura continua no fertilizada (AC_NF= 42%) y rotación con pasturas fertilizada (RP_F= 34%).

El sistema AC_F es simplemente un referente experimental ya que es una situación de tan grave degradación que no representa ninguna situación comercial. Prácticamente en ningún año se superan los rendimientos de indiferencia.

La rotación con pasturas muestra una DER algo mayor que la rotación continua fertilizada. Sin embargo el rendimiento de indiferencia se supera en mayor proporción de años que con la agricultura continua fertilizada. Esta mejor performance ocurre aun cuando el trigo en general se siembra al tercer año luego de roturada la pastura cuando ya los beneficios de su residualidad son mucho menores.

b. Análisis mediante Árbol de Clasificación-Regresión.

La variabilidad interanual para el período crítico de floración del trigo muestra como es usual a las precipitaciones con el mayor coeficiente de variación (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización de la variabilidad climática interanual en el periodo crítico de trigo definido en 15 días antes y 15 días después de la floración.

	PP	T m	T mx	T mn	Rad
Media	97,47	15,6	20,74	10,88	13568
CV	57,86	8,86	7,54	12,46	14,39
Mín	13,5	13,35	18,41	8,57	9452
Máx	259,83	17,9	23,96	13,35	17086

PP: precipitaciones (mm), Rad: Radiación solar acumulada (MJ/m^2), Tm: Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), T mx: Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), T mn Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$).

Las variables climáticas tienen correlaciones relativamente importantes entre ellas y por lo tanto hacen difícil establecer modelos lineales con ellas en conjunto. Por otra parte esos modelos solamente explicarían relaciones lineales entre factores. El árbol de regresión permite identificar el factor y el umbral de la variable más crítica para discriminar el efecto en rendimientos. El análisis por árbol de regresión muestra como la temperatura mínima es el primer factor en clasificar rendimientos y luego la temperatura máxima discrimina los rendimientos del grupo inferior en la primer clasificación.

El análisis por árbol de clasificación determina que el primer factor que discrimina los mayores rendimientos son las temperaturas mínimas bajas, el segundo las temperaturas máximas bajas y el tercero con efecto significativo fue la radiación solar mayor (Tabla 4). La aplicación de este modelo no contempla el efecto de los sistemas de manejo, sino que analiza su comportamiento frente a la variación climática en forma independiente.

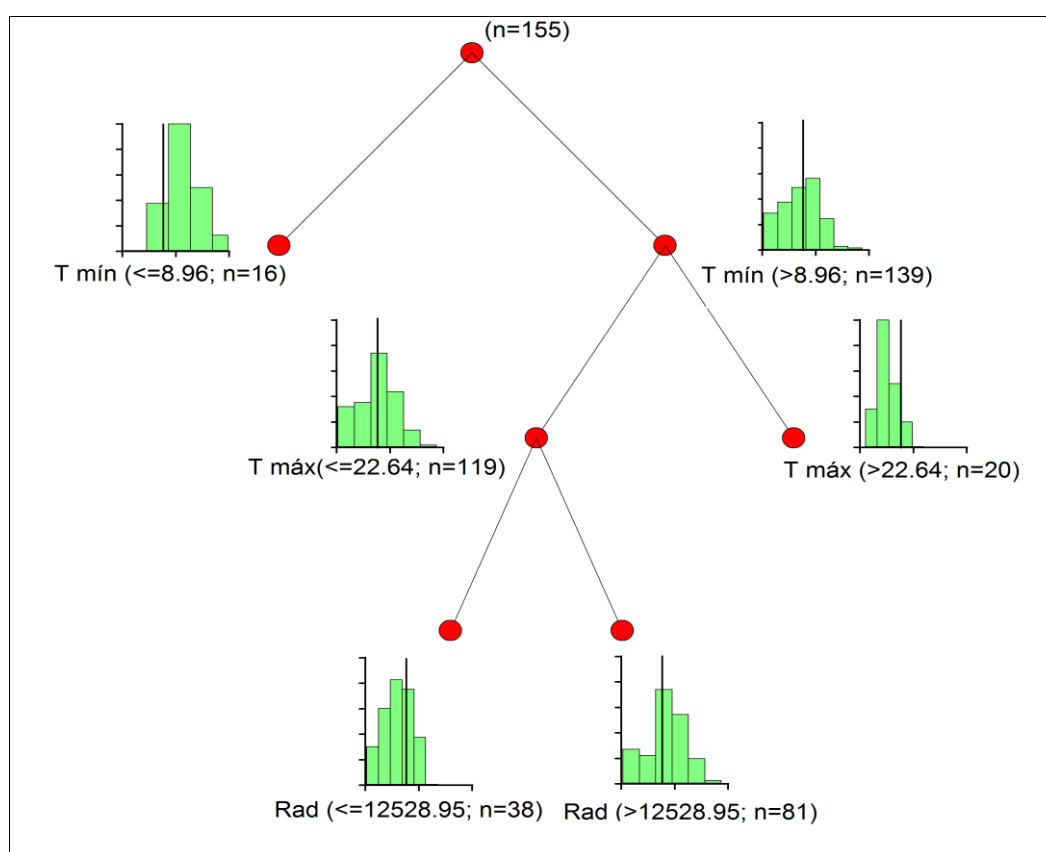


Figura 1. Árbol de clasificación de los rendimientos en el ELD de La Estanzuela en función de la variabilidad climática interanual.

Serie de Experimentos para Potencial de Rendimientos.

Durante los períodos 1985-1994, 1998-2003 y 2005-2009 se condujo en la Estanzuela una línea de trabajo con el objetivo de establecer potenciales de rendimiento de cultivares de ciclo intermedio-corto y de ciclo largo, ajustando la fecha de siembra según el ciclo. Los experimentos contaban con tratamientos con dosis variables de N, para algunos años se realizó evaluación con y sin protección de enfermedades (1985-1994, 2006, 2008-2009). En este estudio se analizarán los resultados de los tratamientos de: protección total con fungicidas sin fertilización (PT_NF), del máximo rendimiento obtenido con fertilización (PT_F) y del máximo rendimiento obtenido con fertilización sin protección con fungicidas (SP_F).

Tabla 4: Valores de rendimiento medio, mínimo, máximo y coeficiente de variación para el ensayo de potenciales de rendimiento de trigo según tratamiento.

Tratamiento	n	Media	Mín.	Máx.	CV
PT_NF	99	3422	1450	7806	33,45
PT_F	123	4933	1973	9784	25,91
SP_F	33	4064	2364	6300	24,37

a. Análisis mediante Modelos Lineales Mixtos

Mediante un modelo lineal mixto se estimó el efecto aleatorio del año, explicado en gran parte por el clima, en un 41% de la variabilidad total de los rendimientos. Se estimó además el efecto de las prácticas de manejo sobre el rendimiento.

En este ensayo, en el cual la mayor parte de los tratamientos recibió protección con fungicidas, se obtuvieron probabilidades de correlación del rendimiento con las variables climáticas de temperatura y precipitación sensiblemente más bajas que las que las encontradas para el experimento de larga duración. Ese efecto menor estaría originado en menores efectos de depresión por sanidad con variables climáticas predisponentes al existir control químico. Tanto el tratamiento como el ciclo del cultivo mostraron un efecto significativo sobre los rendimientos. Al comparar ambos tratamientos protegidos se observa el efecto de la fertilización es de 1547 kg/ha. El tratamiento SP_F tiene un rendimiento mayor que el tratamiento PT_NF, superándolo en 605 kg/ha. En cuanto al ciclo de los cultivos se encontró que los cultivos de ciclo largo superan a los de ciclo intermedio corto en 674kg/ha.

b. Análisis mediante Árboles de Clasificación-Regresión.

En el tratamiento de PT_F la precipitación efectiva en período crítico separa el primer y el segundo grupo de rendimientos, siendo en primer caso por excesos y en segundo lugar por déficit, estas condiciones generan disminuciones del 17 y 20% del rendimiento respecto al grupo de casos en los cuales estas condiciones no se presentaron. Cuando no ocurrieron extremos de PP la variable que separó los rendimientos fue la T máxima, la cual mostró un efecto negativo del orden el 24% en los rendimientos en caso de superar los 23.2 °C.

En el tratamiento de PT_NF, las temperaturas medias mayores a 17 °C generan reducciones del rendimiento del orden del 27%. En caso de no ocurrir estas temperaturas medias desfavorables el segundo factor en separar los rendimientos es la radiación, donde valores acumulados menores a 16342 cal/cm² generan disminuciones del rendimiento del orden del 23%. Un comportamiento similar se encontró en el tratamiento SP_F donde la radiación acumulada es el primer factor en separar los rendimientos, en este caso el valor crítico es muy similar, 16369 cal/cm², y con altas radiaciones los rendimientos son mayores en el orden del 31%. Cuando las radiaciones acumuladas son menores el segundo factor en separar los rendimientos fue la T min, siendo las reducciones en rendimiento del orden del 44% en caso de ocurrir T mínimas mayores a 12.89°C.

De la regresión de los rendimientos y la precipitación se encuentra, para todos los tratamientos, la relación cuadrática que sugiere el árbol de PT_F, donde independientemente del ensayo, la precipitación limita tanto por déficit como por excesos (Figura 2). Por otra parte es muy importante verificar la importancia de los excesos de lluvia en el periodo crítico ya que por encima de los 120 mm no se encuentra ningún rendimiento que supere los 5000 kg/ha, mientras que cuando llovieron menos de 120mm hay 50 casos que superan los 5000 kg/ha en un total de 125 registros de muy diversas condiciones ambientales y tratamientos. Seguramente en condiciones comerciales de producción ese límite es significativamente inferior y revela que aun con el mejor conocimiento de manejo sanitario y nutricional altas condiciones hídricas en floración limitan marcadamente la expresión de rendimientos. Particularmente preocupante es la coincidencia de incremento del régimen hídrico en nuestras primaveras como consecuencia del cambio climático.

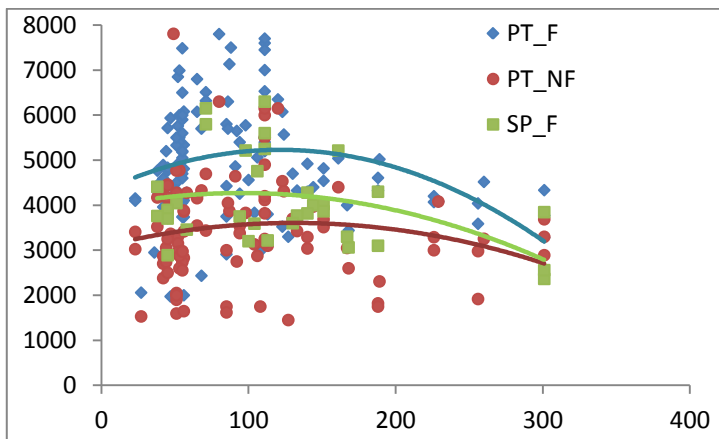


Figura 2: Regresión entre precipitación en período crítico y el rendimiento de trigo del ensayo de potenciales de rendimiento .

CONCLUSIONES

La producción de trigo en sistemas diversificados con pasturas evidenció menos riesgo de alcanzar umbrales de productividad de indiferencia que sistemas agrícolas diversificados principalmente como consecuencia de su mayor productividad promedio.

De acuerdo a los resultados evaluados los aumentos de precipitación en Octubre podrían aumentar la expresión de problemas sanitarios principalmente por fusariosis de la espiga que se traducirían en mermas de rendimiento y calidad de grano. El control sanitario mediante defensivos y resistencia genética sería cada vez más crítico de confirmarse la tendencias de lluvias de los últimos 40 años.

La tendencia de aumento de temperaturas mínimas y máximas en el mes de octubre puede contribuir también a reducciones del rendimiento, ya que se asocia a disminuciones del período de llenado de grano. Por el contrario la asociación de aumento de temperaturas mínimas puede mermar el riesgo de heladas tardías. Ello impactaría positivamente reduciendo el riesgo de daños ocasionales en la floración del trigo. El planeamiento de fechas de siembra, según ciclo de los cultivares, para diversificar fechas de floración cobra importancia al confirmarse las tendencias de mayores temperaturas y humedad en ese período crítico.

La tendencia a disminución de las lluvias en el periodo invernal podría beneficiar la incidencia de enfermedades foliares que son estimuladas por este factor en el período invernal. Asimismo también se reduciría el riesgo de pérdidas de nitrógeno con aumentos de la eficiencia de utilización.

En el período de floración precipitaciones superiores a 120 mm, temperaturas máximas superiores a 23°C, temperaturas mínimas superiores a 9°C, o radiaciones inferiores a 16300 MJ/m² fueron identificados como valores críticos para inducir significativas pérdidas de rendimiento.

BIBLIOGRAFIA

- Breiman, Leo; Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software.
- Diaz R, A. Quincke, A. Morón, J. Sawchik, W. Ibáñez, M. Balzarini. (2010) Efecto de la Degradación del Carbono Orgánico del Suelo en la Productividad Potencial de los Cultivos. In: Resúmenes del Congreso de la Ciencia del Suelos Colonia, Uruguay.
- Diaz de Ackermann M, Pereyra, S. (2011). Fusariosis de la espiga de trigo y cebada. En: Manejo de enfermedades en trigo y cebada. INIA, Serie Técnica N° 189. p 111-128.
- García A., Diaz de Ackermann M. Nitrogen response with different fungal disease pressure and chemical fungicide strategies for No-till wheat (in press).
- Patterson, H., Thompson, R. (1971). "Recovery of inter-block information when block sizes are unequal". Biometrika 58 (3): 545.