Efectos del clima, el suelo y el manejo sobre la productividad de cultivos en un agroecosistema experimental

Lic. Felipe García Olaso

TESIS DE MAESTRÍA PEDECIBA SUBÁREA ECOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.

Efectos del clima, el suelo y el manejo sobre la productividad de cultivos en un agroecosistema experimental

TESIS DE MAESTRÍA PEDECIBA SUBÁREA ECOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.

Lic. Felipe García Olaso

25 de Junio de 2012

Efectos del clima, el suelo y el manejo sobre la productividad de cultivos en un agroecosistema experimental.

Autor de la tesis: Lic. Felipe García Olaso
(fgarola@fcien.edu.uy)

Director: Dr. Mauricio Lima Arce

Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. (mlima@bio.puc.cl)

Co-director: Dr. Matías Arim Ihlenfeld

Departamento de Ecología y Evolución, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo. (arim@fcien.edu.uy)

Tribunal de evaluación: Dr. Daniel Conde

Dr. Walter Baethgen

Dr. Danilo Calliari

RESUMEN

El escenario actual de alteración y deterioro de los ecosistemas a nivel global llama hoy más que nunca a aumentar los esfuerzos para asegurar la conservación de los ecosistemas y todos sus servicios. Si bien la intensificación del uso de suelo para la producción es una de las principales causas del deterioro, sigue siendo necesario generar alimento, fibra y madera y hacerlo compatible con la conservación de la función ecosistémica. La productividad primaria es el proceso ecosistémico que provee de estos servicios básicos y su manejo es una de las actividades de mayor importancia social, cultural y económica. Por todo esto se hace fundamental estudiar y comprender la productividad primaria a escala local y global para monitorear y manejar sus cambios en pos de la salud de la biósfera y el sustento de la sociedad humana.

A gran escala el clima es el factor de estado que más fuertemente determina los procesos ecosistémicos. El interés por comprender los efectos del clima y las variables meteorológicas sobre la agricultura es muy antiguo, sin embargo todavía no han sido debidamente comprendidos.

En esta tesis se presenta un estudio estadístico que explora la relación entre las condiciones climáticas y la productividad de cultivos de trigo y sorgo en el Suroeste de Uruguay, tomando en cuenta los efectos del suelo y del manejo. Se analizan mediante regresiones múltiples los datos de 42 años en un ensayo de largo plazo con tratamientos de diferente intensidad de uso de suelo.

Los resultados indican congruentemente la importancia del clima para determinar la productividad de los cultivos de sorgo y trigo. Se detectaron numerosas y fuertes asociaciones entre variables climáticas locales y el rendimiento de grano pero con respuestas diversas, indicando un efecto general del clima con estructura causal compleja, que involucraría procesos bióticos, fisiológicos, abióticos y de interacción. Se discuten estos mecanismos. En el caso del sorgo, el efecto del carbono orgánico del suelo sobre el rendimiento estaría interactuando con el clima, modulando su efecto. El efecto de los tratamientos fue importante en ambos cultivos y explicó más varianza que la fertilización y el COS, denotando que habría otros procesos, probablemente biológicos asociados a ellos.

Se discuten las posibilidades de nuevas evaluaciones y estudios que permitan a futuro profundizar en la comprensión de los procesos asociados a la productividad de cultivos, la productividad primaria y el ciclo de carbono en agroecosistemas uruguayos.

A mi abuelo Raúl...

AGRADECIMIENTOS

A Matías Arím y Mauricio Lima por aceptarme como estudiante, con toda la disposición que eso significa en todos los aspectos.
A Daniel Conde, Walter Baethgen, Danilo Calliari por aceptar ser miembros del tribunal, por su disposición, dedicación y correcciones que mejoraron sensiblemente la versión final de esta tesis.
A las instituciones que hicieron posible que realizara este posgrado PEDECIBA, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, INIA y ANII, por apoyo financiero e institucional.
A Roberto Zoppolo y Alfredo Albín por apoyar desde un principio mi formación.
A Andrés Quincke y Roberto Díaz por brindarme las facilidades para entender, conocer y analizar los datos del ensayo y discutir las ideas para esta tesis.
Andrés Berger, Guadalupe Tiscornia, Adrian Cal, Adriana García y otros investigadores de INIA de los que recibí comentarios o datos durante la realización de esta tesis.
A Santiago Dogliotti, Pablo Tittonel, Göran Ågren, Mónica Balzarini y otros investigadores y docentes con los que intercambié ideas primarias de esta tesis y bibliografía.
A mi familia, especialmente a mis padres y también a mis hermanos por estar siempre, por ser un apoyo incondicional en mi vida.
A Dios y a la vida que me han dado tanto.
A todos mis amigos… :
A los de toda la vida, queridos Agus, Nico y Marcos.
A todos los amigos de la facu, en especial a Merce por su incondicional y valiosísima ayuda con los "papers"! y a Maca y Caro por su apoyo cercano.
A los amigos del GDT, en especial a Vale, Lu y Dani Jr. por horas de encaring compartido.
A los amigos de Izarra.
A los amigos del Taller, en especial a Javi.
A los amigos de Averaves y Arenas, en especial a Nati por compartir horas de estudio.
A los amigos del Jolgory por todos los días de estudio compartido, con la diversión, convivencia y paciencia que eso significa. En especial a Juan, Daniel, Carla y Mauro por su ayuda con la programación en R.
A todos los amigos y compañeros de laburo en INIA, en especial a Roberto, Varinia, Juan José, Richard, Robert, Paula, Matilde, Verónica, Andrea, Santiago, Ma. Marta, Adriana, y Laura O. por su compañía y aguante en el día a día, por ayudarme en mi trabajo diario y con la bibliografía, en especial durante este período de mi maestría.

ÍNDICE

Resumen 4

Agradecimientos 6

Índice 7

Introducción y antecedentes 8

Hipótesis 18

Objetivos 18

Objetivo general 18

Objetivos específicos 18

Métodos 20

Ensayo 20

Bases de datos 22

Análisis de datos 22

Resultados 26

Análisis exploratorio 27

Modelos de regresión múltiple 33

Discusión 39

Conclusiones y perspectivas 48

Referencias bibliográficas 50

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El uso del suelo para obtener bienes y servicios representa una de las alteraciones más sustanciales del ser humano sobre los ecosistemas del planeta (Tilman et al. 2002). Entre un tercio y la mitad de la superficie de la tierra ha sido transformada alterando la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Cassman et al. 2003), destacándose la modificación drástica del ciclo del agua (Cassman et al. 2003) y del nitrógeno (Vitousek et al. 1997). Adicionalmente, la transformación y fragmentación de hábitat, entre otros, ha llevado a una gran disminución de la biodiversidad global (Matson et al. 1997; Vitousek et al. 1997). El suelo y su calidad son el sostén de la productividad primaria y otros servicios ecosistémicos. El laboreo de las tierras ha conducido a la degradación y erosión de los suelos más productivos en vastas regiones del planeta, disminuyendo su fracción de carbono orgánico, principal componente de su fertilidad y por lo tanto afectando la productividad primaria (Díaz-Rosselló 2003). Ésta también se ve ampliamente afectada por el reemplazo de especies por aquellas de interés para la alimentación, fibra o madera (Tilman 1997; Tilman et al. 2001). Por otro lado, la deforestación y el cultivo del suelo han aportado el 40% de las emisiones de CO_2 hacia la atmósfera causadas por actividades humanas desde 1850 (Houghton 2003), determinantes en un contexto de cambio climático global (Amundson 2001). Este cambio climático global podría afectar aún más el funcionamiento ecosistémico, la productividad primaria y otros servicios (Rosenzweig y Parry 1994; Schlenker y Roberts 2009; Zhao y Running 2010). Este escenario de alteración y deterioro de los ecosistemas llama hoy más que nunca a enfatizar los esfuerzos para asegurar la cada vez más comprometida conservación de la naturaleza y todos sus servicios (Vitousek et al. 1997; Cassman et al. 2003; Carpenter et al. 2011). Si bien la instensificación de las actividades de uso de suelo para la producción es una de las principales causas del deterioro natural (Matson et al. 1997; Tilman et al. 2002), sigue siendo necesario generar alimento, fibra y madera para cubrir la demanda básica de una creciente población mundial (Evans 1998; Alexandratos 1999; Cassman 1999; Fedoroff y Cohen 1999).

La humanidad se encuentra entonces en un momento crítico y desafiante para la sustentabilidad de la vida en el planeta. Para hacer compatible la suficiente producción de alimentos y la conservación de la función ecosistémica a nivel global, sería

fundamental evitar la expansión del área cultivada sobre los ecosistemas naturales, incrementar la eficiencia en el uso de nutrientes, hacer realidad los rendimientos potenciales y mantener o mejorar la calidad del suelo en ecosistemas destinados a la producción de alimentos (Matson et al. 1997; Cassman 1999; Tilman 1999; Tilman et al. 2002; Cassman et al. 2003).

Enfoque ecosistémico

El enfoque ecosistémico contribuye a comprender los factores bióticos y abióticos como componentes interactuando en un solo sistema integrado y a entender los procesos que suceden a distintas escalas, incluyendo la global (Ågren y Bosatta 1998). Esto se hace especialmente necesario en el escenario actual, donde la ecología de sistemas y las ciencias del suelo y vegetales permiten vislumbrar un fructífero campo de trabajo en la integración de ambos (Ågren y Bosatta 1998). Este camino promete generar aportes y toma especial importancia en un contexto de crisis por deterioro de los sistemas naturales y servicios ecosistémicos, incluyendo el cambio climático global (Bennett et al. 2003).

El estudio de los procesos ecosistémicos representa uno de los principales focos de investigación en ecología, a distintos niveles de organización y con diversos abordajes (Lindeman 1942; Rosenzweig 1968; Shawcroft et al. 1974; van der Heijden et al. 1988; Martínez 1995; Wootton 1998; Lima et al. 2002; Meir et al. 2006; Cardinale et al. 2006; Chen et al. 2009; Schlesinger et al. 2009). Los ecosistemas están caracterizados y gobernados por interacciones internas y factores externos. Tempranamente, Jenny (1941) menciona para ecosistemas terrestres al material parental (roca madre), el clima, la topografía, la biota potencial y el tiempo como los factores de estado que determinan el tipo de suelo y la estructura y funcionamiento del ecosistema (Amundson y Jenny 1997). Por otro lado, los ecosistemas también presentan controles interactivos. Éstos se definen por la capacidad de regular y ser regulados por los procesos ecosistémicos, a partir de sus retroalimentaciones. Entre los controles interactivos se encuentran la disponibilidad de recursos, las propiedades físicas o químicas moduladoras (e.g. temperatura, pH, radiación UV), la comunidad biótica y el régimen de disturbios, incluyendo las actividades humanas (Chapin et al. 1996, 1997, 2004; Meir et al. 2006). Por ejemplo, la temperatura en un ecosistema es un control interactivo, ya que está

restringida por el clima pero es sensible a procesos ecosistémicos como el sombreado y la evaporación.

Productividad primaria y su importancia

El funcionamiento ecosistémico depende en gran medida de la energía que ingresa al mismo alimentando sus procesos. El ingreso y el flujo energético a través de un ecosistema están íntimamente acoplados al ingreso y flujo de materia. En particular el ciclo del carbono (C) determina el flujo de energía en los sistemas bióticos en forma de compuestos carbonados. La energía y el C son incorporados cuando la radiación solar es utilizada en la fotosíntesis para oxidar CO_2 (Mooney 1972). Este proceso es denominado productividad primaria bruta, definida para el caso de esta tesis, como el total de compuestos orgánicos producidos por fotosíntesis por unidad de área y tiempo (Begon et al. 2006). Luego la energía y el carbono continúan transfiriéndose acoplados a través de los niveles tróficos y posteriormente pueden salir de los compartimentos bióticos cuando la materia orgánica es depositada, oxidada por respiración de los organismos o por combustión (Lindeman 1942). Los materiales y la energía ciclan a su vez por los compartimentos abióticos (Begon et al. 2006).

La productividad primaria es entonces el proceso por el cual ingresa la energía y el carbono a los compartimentos bióticos de los ecosistemas. Esta función de los ecosistemas es crítica para la vida de todos los organismos heterótrofos, proveyéndolos de recursos tróficos y estructurando las comunidades y los sistemas bióticos mediante una variedad de mecanismos (Rosenzweig y Abramsky 1993; Waide et al. 1999; Tilman et al. 2001). En las sociedades humanas, además de alimento, provee materiales como fibra, madera y combustible. De esta manera, la fijación de carbono atmosférico es el proceso ecosistémico que provee los servicios ecosistémicos más básicos, los de provisión (Millenium Ecosystem Assessment 2005) y su manejo es una de las actividades de mayor importancia social, cultural y económica (Evans 1980; Lobell et al. 2007). Por otro lado, la productividad primaria también representa el mayor flujo anual de carbono desde la atmósfera hacia la biósfera y es considerada como la principal causa de las fluctuaciones estacionales en la concentración de CO_2 atmosférico (Ciais et al. 1995; Keeling et al. 1996), un fenómeno crítico en tiempos de calentamiento global. Por todo esto se hace fundamental estudiar y comprender la producción primaria a escala

local y global para monitorear y manejar sus cambios en pos de la salud de la biósfera y el sustento de la sociedad humana (Churkina y Running 1998).

Desde la antigüedad existe el interés por entender los mecanismos que regulan la productividad, en particular en cultivos (Engledow y Wadham 1923; Evans 1980). Desde épocas tempranas numerosos estudios se han realizado relacionando la productividad vegetal de distintas especies en distintos ambientes con los diversos factores que la regulan. Se pueden encontrar trabajos que relacionan la productividad de cultivos con la identidad genética de la especie o variedad cultivada, el tipo de suelo, población de plantas, disponibilidad de nutrientes, disponibilidad de agua, prevalencia de enfermedades, sistema de laboreo y aplicación de fertilizantes, entre otros, en diversas épocas y regiones del mundo (Eden y Fisher 1927; Balmukand 1928; Clements 1964; Bleasdale 1966; Salter y Goode 1967; Nix 1976; Teng et al. 1977; Moriondo et al. 2007; Bannayan et al. 2010). Durante el último siglo estas líneas de investigación han avanzado en comprender los factores que afectan la productividad de cultivos y han permitido desarrollar sofisticadas prácticas para manejarla. Sin embargo, todas estas investigaciones también coinciden en señalar que uno de los factores más importantes y que sigue regulando fuertemente la productividad de cultivos es el clima (Gregory 1926; Adams et al. 1998; Chen et al. 2004).

El clima como regulador de procesos

El interés por comprender los efectos del clima sobre la agricultura es tan antiguo como la agricultura. Sin embargo, estos efectos todavía no han sido debidamente comprendidos. A gran escala el clima es el factor de estado que más fuertemente determina los procesos ecosistémicos (Field et al. 1992; Stenseth et al. 2002; Weltzin et al. 2003; Chapin et al. 2004; Lensing y Wise 2006; Krave et al. 2007; Lima 2007). La distribución del clima en grandes escalas espaciales explica la distribución de biomas y la variabilidad de las condiciones climáticas explica en su mayor parte la variación anual e interanual en la productividad de los ecosistemas (Cane et al. 1994; Churkina y Running 1998; Holmgren et al. 2006). El clima también afecta al resto del ciclo de carbono terrestre regulando las tasas de las reacciones químicas y por lo tanto las tasas metabólicas de los organismos y la descomposición de los compuestos orgánicos (Brown et al. 2004; Chapin et al. 2004). Por lo tanto, toma un rol preponderante en

determinar el balance de carbono en el suelo y en el ecosistema (Brye et al. 2002; Qi 2002; Brady y Weil 2009).

Es ampliamente aceptado que las variables climáticas radiación solar, temperatura y precipitación interaccionan para afectar el crecimiento vegetal (Went 1953; Morgan 1984; Field et al. 1992). La complejidad de la respuesta en productividad de los cultivos a las variables climáticas y de la estructura causal entre éstas ya fue puesta de manifiesto por Fisher (1925). Se puede esquematizar que a escala diaria la fotosíntesis en una planta con un área de hoja determinada depende de la concentración de CO_2 en el aire, la radiación de energía lumínica, la disponibilidad de nutrientes, la disponibilidad de agua en el suelo y la temperatura. Por los estomas de la superficie de las hojas entra el CO_2 necesario para generar compuestos carbonados en la fotosíntesis y sale el agua transpirada, la cual permite el flujo de nutrientes, la turgencia y regula la temperatura de la hoja. Por tanto existe un claro compromiso entre la fotosíntesis y la evapotranspiración que la planta regula por la apertura estomática (Turner et al. 1985; Romero 2002; Chapin et al. 2004). La temperatura regula las tasas de las reacciones químicas y de difusión, el potencial de evapotranspiración del aire y por lo tanto, la apertura estomática y la fotosíntesis (Went 1953; Salisbury y Ross 1992; Chapin et al. 2004). La disponibilidad de agua, como se dijo, permite el flujo de nutrientes y la turgencia y regula la temperatura por lo que afecta también a la apertura estomática y la relación entre fotosíntesis y evaporación (Hsiao 1973; Morgan 1984; Turner et al. 1985; Ågren 2008).

A la escala de meses o un año la productividad primaria bruta de un ecosistema también varía con la radiación lumínica, la temperatura y la precipitación. Por un lado, las tres variables lo harán por la vía de la variación en el largo de la estación de crecimiento y del área de hoja durante esta estación (Chapin et al. 2004). Por otro lado, la temperatura también lo hará por la vía de las variaciones interanuales en el estímulo del termoperíodo y su modulación del fotoperíodo, responsables de estimular etapas de crecimiento, o desarrollo de órganos determinados, como la germinación o la floración (Went 1953; Lawn et al. 1995).

Se han realizado variedad de investigaciones que relacionan la variabilidad interanual en las variables temperatura y precipitación con la productividad de cultivos (Fisher

1925; Peacock 1975; Cane et al. 1994; Stige et al. 2006). Dada una región geográfica y variedades genéticas que presentan una adaptación determinada al ciclo de crecimiento, las variables climáticas se asocian significativamente con la productividad de cultivos (Fisher 1925; Buck 1961; Baier 1973; Huda et al. 1976; Evans 1980). Las respuestas a temperatura y precipitación son variables entre especies y regiones (Buck 1961; Baier 1973; Huda et al. 1976; Evans 1980).

Varios estudios coinciden en identificar que las correlaciones de temperatura o precipitación con rendimiento están relacionadas a una modificación en el largo de la estación de crecimiento, por temperaturas más beneficiosas o por disponibilidad de agua (Freckleton et al. 1999; Alexandrov y Hoogenboom 2000; Chen et al. 2004). La mayoría de los cultivos presentan etapas críticas en su crecimiento durante las cuales el clima los afecta más y poseen diferentes condiciones óptimas de crecimiento para diferentes etapas del desarrollo (Went 1953; Baier 1973). En particular para el trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivado en zonas templadas o cálidas varios estudios acuerdan en señalar a la temperatura durante o después de la floración (antesis) como determinante del rendimiento de grano afectando el número de granos o acortando su período de crecimiento (Ferris et al. 1998; Menéndez y Satorre 2007; Modhej y Banisaeidi 2010). Cuando el cultivo de trigo se estudió en zonas de suelos arcillosos y con un nivel suficiente de precipitaciones, éstas mostraron correlaciones negativas con el rendimiento, interpretándose que el cultivo sufría períodos de exceso de agua en el suelo (Chmielewski y Potts 1995). Por otro lado, también es conocido en trigo el efecto del fotoperíodo, temperatura y vernalización (estímulo por bajas temperaturas en invierno) en determinar el momento de floración (Lawn et al. 1995; Berger et al. 2011). Baier (1973) encontró que un buen modelo de productividad de cultivos debe dar cuenta de la interacción entre temperatura, humedad del suelo y radiación. Para algunos cultivos y pastos se encontró que medidas de evapotranspiración potencial, real o combinaciones de ambas estaban correlacionadas con la productividad primaria (Buck 1961; Baier 1973) .

Con el avance en el conocimiento de los procesos eco-fisiológicos que gobiernan la fotosíntesis y la productividad de cultivos se produjo un gran desarrollo de complejos modelos basados en la formalización matemática de estos mecanismos (Baier 1973; Ritchie et al. 1988; Decker 1994; Riha et al. 1996; Menéndez y Satorre 2007; Schlenker y

Roberts 2009). Estos modelos han sido muy utilizados para la simulación ya que de esa forma permiten explorar potenciales y escenarios de producción (Adam et al. 2011). Sin embargo, estos modelos requieren de gran cantidad de variables y parámetros para calibrarse, que no siempre se encuentran disponibles (Adam et al. 2011). Se caracterizan por enfatizar los controles fisiológicos del clima sobre el crecimiento vegetal pero raramente toman en cuenta simultáneamente todas las condiciones que afectan la productividad. Por otra parte, este tipo de modelos no son capaces de predecir interacciones complejas del clima con el sistema biótico, por ejemplo los efectos medianamente simples del clima en la promoción de enfermedades y plagas (Lobell et al. 2007). Los modelos histórico- estadísticos o empíricos son complementarios a estas aproximaciones y poseen un conjunto de ventajas y desventajas (Lobell et al. 2007; Adam et al. 2011).

Se encuentra bien descrito el efecto de los fenómenos climáticos de gran escala en la productividad de cultivos. En varias regiones del mundo, cuando las fases de la Oscilación Sur "El Niño" (ENOS) afectan las condiciones climáticas durante las etapas críticas de los cultivos el impacto en la productividad es evidente. Nuestra región también cuenta con variados estudios, por ejemplo, Myeni y colaboradores (1996) encontraron fuertes anomalías negativas de productividad en los pastizales naturales de Uruguay durante la fase La Niña de 1988/89 y anomalías positivas más débiles durante la fase El Niño de 1982/83. Baethgen (1998a) encontró anomalías negativas más fuertes durante años de La Niña que las anomalías positivas durante años El Niño en rendimientos de grano en maíz (*Zea mays* L.) en Uruguay. De forma similar, Podestá y colaboradores (1999, 2002) reportaron que las disminuciones de rendimiento de maíz y sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) durante años La Niña eran mayores y menos variables que los aumentos durante años El Niño. Otros estudios han reforzado estas tendencias para maíz, soja y arroz, encontrando, sin embargo, la tendencia opuesta para girasol (Podestá et al. 1999; Travasso et al. 2003; Roel y Baethgen 2004). Estos estudios asociaron las variaciones en rendimientos a anomalías negativas de precipitación en noviembre durante los años La Niña y anomalías positivas de precipitación en diciembre durante los años El Niño.

El carbono en el suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) es un componente fundamental en determinar la fertilidad y por tanto la productividad primaria potencial en un suelo determinado. La MOS se define como la mezcla contenida en el suelo de fracciones muertas reconocibles de vegetales y animales, biomasa de microorganismos y material de origen biótico que ha sido alterado al grado de no presentar la estructura original (Amundson 2001). Dada su composición, frecuentemente se utiliza al carbono orgánico del suelo (COS) como estimador directo de la MOS (MOS $\cong 1.72 \times$ COS; Brady y Weil 2009). La MOS produce diversos efectos directos e indirectos como el aumento de la actividad micro y macro biológica, la estructuración física, la dinámica del agua, el oxígeno y los nutrientes. Muchos de estos cambios tienen gran efecto promotor del crecimiento vegetal (Magdoff et al. 2000; Magdoff y Weil 2004; Brady y Weil 2009). El aumento de la productividad vegetal aumenta también la deposición de residuos que ingresan como materia orgánica al suelo, por lo que, se pueden llegar a dar retroalimentaciones entre estos efectos (Kulmatiski et al. 2008). Por otro lado la MOS modifica algunos otros procesos ecosistémicos de importancia como la erosión de suelo, lixiviación de nutrientes y contaminantes y recarga del agua subterránea (Magdoff et al. 2000; Magdoff y Weil 2004; Brady y Weil 2009). La disminución del carbono orgánico del suelo (COS) cuando se realiza agricultura con laboreo, ha sido ampliamente reportada (Mann 1986). Esta es más rápida durante los primeros años de uso agrícola y luego se hace más lenta, tendiendo a un nuevo equilibrio si la erosión es baja (Mann 1986; Brady y Weil 2009). La intensidad y el tipo de laboreo determinan la desestructuración, oxidación y erosión del suelo, lo que provoca pérdidas significativas en el contenido de COS (Díaz-Rosselló 1992, 2003; Six et al. 1999; Terra y García-Préchac 2001; Six y Jastrow 2002; Lal 2004; Franzluebbers 2010; Salvo et al. 2010). Para mantener o incrementar la MOS en suelos agrícolas se han utilizado diversas prácticas como la reducción en la intensidad del laboreo del suelo, el uso de cultivos que maximicen la cantidad de residuos dejados sobre la superficie del mismo (Six et al. 1999) y las rotaciones con pasturas. Éstas últimas han demostrado una gran capacidad de revertir los procesos de degradación de los suelos y recuperar su capacidad productiva (Díaz-Rosselló 1992, 2003; García-Préchac et al. 2004). Sin embargo, su utilización es poco distribuida en el mundo, salvo en zonas de Argentina y en Uruguay (García-Préchac et al. 2004). A mediados de la

década del 90, las encuestas de uso del suelo revelaban que la totalidad de la agricultura de granos en Uruguay se hacía en rotación con pasturas (Díaz-Rosselló 2003). Durante los períodos bajo pasturas perennes plurianuales se da un incremento rápido del COS y por lo tanto se asocian a la productividad y sustentabilidad de los sistemas (Díaz-Rosselló 1992, 2003; García-Préchac et al. 2004; Díaz-Rosselló et al. 2009).

Antecedentes en Uruguay

Son escasos los estudios empíricos que relacionan directamente variables climáticas locales con la productividad de cultivos en nuestro país. Sin embargo se encuentran algunas aproximaciones y análisis con respecto a los posibles efectos del clima sobre la productividad de cultivos. Díaz-Rosselló y colaboradores (2009), en un estudio que evaluaba el efecto del COS sobre la productividad, caracterizaron el efecto del clima únicamente como "años malos" y "años buenos" a partir de desvíos en los residuales de sus modelos y encontraron que éste era el factor que más influenciaba los rendimientos. También reportan la interacción de este factor climático con el COS sobre los rendimientos.

Los cultivares de trigo sembrados en Uruguay son de hábito primaveral, con bajo o nulo requerimiento de vernalización y diferente grado de sensibilidad al fotoperíodo (Germán et al. 1995). Los rendimientos son menores que en otras zonas de latitud similar y parecen estar principalmente limitados por condiciones climáticas (Kohli y Martino 1998). En un estudio sobre fertilización nitrogenada, se concluyó que el trigo responde a la fertilización nitrogenada pero que la variabilidad interanual adjudicada a factores climáticos era mayor (García-Lamothe 1998). Baethgen (1998) realiza un análisis mediante modelos de simulación para detectar las principales limitantes climáticas. Entre las que menciona se encuentran una baja radiación previa a la floración que disminuye la fotosíntesis, elevadas temperaturas después de la floración que limitan el crecimiento del grano y excesos de agua en el suelo durante estadíos tempranos. También se menciona que, si bien el ambiente de producción de trigo en el Uruguay se caracteriza por una ausencia de déficits hídricos para el cultivo, se observaron algunos períodos secos durante la floración y llenado de grano y éstos fueron asociados a caídas en los rendimientos. Mantel y colaboradores (2000) en otro estudio mediante modelos de simulación que exploraba el potencial para el cultivo de trigo en Uruguay asociado a

la variación geográfica de los tipos de suelo, concluyen que las limitantes potenciales están mayormente relacionadas a la disponibilidad de agua. Por otro lado, las variables climáticas como precipitación, humedad y temperatura están directamente asociadas al desarrollo de enfermedades bacterianas y fúngicas que pueden causar reducciones de más del 50% del rendimiento de grano (Díaz et al. 1998b).

Estrategia y relevancia

Existen, por tanto, tres variables climáticas principales que pueden afectar la productividad de cultivos: temperatura, radiación lumínica y precipitación. Otras variables ambientales como nivel de materia orgánica y nutrientes en el suelo y de manejo como tipo de laboreo o uso de control químico de malezas, también pueden generar variaciones en la productividad en agroecosistemas. Los procesos por los cuales estas variables influyen sobre la productividad se encuentran relacionados y pueden presentar interacciones.

En esta tesis se realiza un estudio estadístico, empírico, para explorar la relación entre las variables climáticas locales y regionales y la productividad de cultivos de grano. Esto se realiza tomando en cuenta los posibles efectos de las variables de suelo, disponibilidad de nutrientes y manejo sobre la mencionada productividad. Para esto se analizan los datos históricos de un ensayo de largo plazo con tratamientos de diferente intensidad de uso de suelo, lo cual garantiza una amplia variabilidad en algunas de las condiciones de crecimiento (tecnología, frecuencia de laboreo, COS, fertilización nitrogenada, etc.) permitiendo evaluar sólidamente la importancia del clima dando cuenta de estas condiciones, y explorar las posibles interacciones.

Con este enfoque se aspira a lograr dos aportes: a) generar información básica sobre el sistema suelo-planta-atmósfera en agroecosistemas uruguayos que permita avanzar en la comprensión de su funcionamiento y b) identificar y cuantificar las relaciones pasadas entre variables climáticas y la producción de cultivos en un sistema del Suroeste de Uruguay. Ambos aportes implicarían un avance para la toma de decisiones en términos de gestión para la conservación y sustentabilidad de los agroecosistemas.

HIPÓTESIS

H1 – En el ensayo estudiado que posee variación en diversos factores que determinan el rendimiento de cultivos (COS, fertilización nitrogenada y épocas tecnológicas), las condiciones climáticas son también un importante determinante de la producción de cultivos.

Este efecto de las condiciones climáticas puede ser directo fisiológico sobre los cultivos o indirectamente proveyendo condiciones para interacciones bióticas con ellos (malezas, enfermedades, plagas, organismos benéficos, etc.).

Predicción: Un modelo estadístico que explique el rendimiento de cultivos de este ensayo incorporará, por criterios de información, al menos una variable climática.

H2 – Las mejores condiciones de estructura física del suelo, exploración radicular, retención de agua, disponibilidad de nutrientes y otros procesos que mejoran las condiciones de crecimiento en presencia de alto COS alteran el efecto del clima sobre la producción de cultivos.

Predicción: Las condiciones climáticas interaccionarán estadísticamente con el carbono orgánico del suelo para determinar el rendimiento de cultivos

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento del funcionamiento de la productividad en agroecosistemas uruguayos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar y cuantificar los efectos del clima sobre la productividad de los cultivos de sorgo y trigo en un agroecosistema experimental del Suroeste de Uruguay considerando los efectos del manejo y el suelo.

Analizar la presencia de interacciones entre el clima y otras variables no climáticas, como el carbono orgánico del suelo, entre los factores que determinan la productividad de los cultivos.

MÉTODOS

ENSAYO

El presente estudio se realiza a partir de los datos del experimento de rotaciones agrícola-ganaderas de largo plazo iniciado en 1963 en la Estación Experimental "Alberto Boerger", La Estanzuela, hoy en día perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). El experimento consta de 21 parcelas de gran tamaño a las que se le aplican siete tratamientos de uso agrícola del suelo. Los tratamientos varían entre agricultura continua y rotaciones en las que se alterna agricultura con pasturas con distinta duración y composición específica de pasturas. El objetivo original fue evaluar la evolución de la fertilidad del suelo en un gradiente de sistemas con distinta intensidad de uso de suelo. La hipótesis principal de este experimento es que para producir cereales y oleaginosos en forma sustentable es necesario incluir en la rotación una fase de pasturas perennes, es decir alternarlos con sistemas ganaderos (Quincke et al. 2009).

Las 21 parcelas son fajas de 5000 m^2 ubicadas al azar en cada uno de los tres bloques, por lo que constituye un clásico diseño de Bloques Completos al Azar. Desde su inicio el ensayo ha recibido algunas modificaciones. En 1973 se desfasaron las rotaciones de las tres réplicas de cada tratamiento en el tiempo, en años subsiguientes, logrando que las tres fases de la rotación estén presentes en todo momento (desde 1973). Es oportuno señalar que la propuesta original del experimento tuvo tres ajustes del diseño (1974, 1983 y 2008). No obstante, los sistemas de uso del suelo concebidos originalmente, prácticamente no variaron en su esencia (Quincke et al. 2009). La única excepción destacable es el cambio que se introdujo en el sistema 4, el cual en 1983 aumentó su proporción de pasturas perennes en la rotación y pasó a ser el sistema con la mayor proporción (4 años). Las rotaciones de los siete sistemas de acuerdo al diseño vigente desde 1983 hasta 2008 se describen en la tabla 1.

El experimento se encuentra instalado en un tipo de suelo Brunosol Eutrico (franco-arcillo-limoso; Díaz-Rosselló 1992). En cuanto a las prácticas agronómicas con las cuales se lleva a cabo el experimento, la fertilización se ha realizado según las recomendaciones nacionales cuyo criterio es el de satisfacer la demanda del cultivo, excepto en el

tratamiento sin fertilización. En cuanto a las prácticas de laboreo, el experimento fue manejado históricamente con laboreo convencional. Inicialmente, se usaba laboreo primario y secundario y desde entonces se ha ido reemplazando gradualmente el tipo de herramientas por tipos de menor perturbación del perfil de suelo. Además, desde mediados de los años 90 se ha ido generalizando el uso de glifosato, en sustitución de operaciones de laboreo, reduciéndose su intensidad (Quincke et al. 2009).

Tabla 1. Secuencia de cultivos y pasturas en los seis años de duración de las rotaciones de los siete sistemas del Experimento de Rotaciones Agrícola-Ganaderas "José L. Castro" en INIA La Estanzuela (tomado de Quincke et al. 2009).

Trat.	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Característica distintiva	N° Sist.
Cultivo Continuo	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo	Agricultura continua	2
Cultivo Cont s/fert.	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo	Igual rotación pero **sin fertilizantes**.	1
Cultivo Continuo (2)	Cebada Sorgo 2ª	Girasol 1ª	Trigo	Cebada Sorgo 2ª	Girasol 1ª	Trigo	Agricultura continua, pero **distinta secuencia**.	6
4 Cult – 2 Pasturas	**Trébol Rojo**	Cebada Girasol 2ª	Trigo c/T. Rojo	**Trébol Rojo**	Cebada Girasol 2ª	Trigo c/T. Rojo	Rotación con una **pradera corta de Trébol Rojo**.	7
3 Cult–3 PP	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo c/Prad	**Pradera mixta**	**Pradera mixta**	**Pradera mixta**	Rotación con una **pradera mixta (de F+TB+L)**.	5
3 Cult–3 PP(L)	Sorgo 1ª	Cebada Girasol 2ª	Trigo c/Lotus	**Lotus**	**Lotus**	**Lotus**	Rotación con **una pradera de Lotus puro**.	3
2 Cult–4 PP	Cebada c/T. Rojo	**Trébol Rojo**	Trigo c/Prad	**Pradera mixta**	**Pradera mixta**	**Pradera mixta**	Rotación con **2 tipos de PP**: T.Rojo y P mixta.	4

Las variables que se registran en el experimento son: a) los rendimientos de los cultivos de grano (lino, trigo, cebada, girasol y sorgo), b) los rendimientos por cortes de las distintas pasturas, c) las variables del suelo: carbono orgánico (COS), nitrógeno total, fósforo disponible y acidez (pH), y d) las variables de manejo: especie sembrada, fertilización nitrogenada, época de siembra.

Los rendimientos se registran cosechando un área conocida de aprox. 400 m^2 y corrigiendo la humedad del grano a una humedad estándar de 14% (Quincke com. pers.). Para la fertilización nitrogenada se pesa el fertilizante aplicado por la sembradora o la fertilizadora corrigiendo el peso para llevarlo a kilogramos de nitrógeno puro por hectárea aplicado. Los análisis de COS se realizan por el método de digestión húmeda de Tinsley (1950) a partir de muestras compuestas de 20 cm. de profundidad tomadas anualmente en el otoño (Díaz-Rosselló 1992).

El ensayo posee registros anuales en el caso de las variables de suelo, anuales o bianuales para las de productividad y diarias en el caso de las variables climáticas, constituyendo hoy en día una base de datos de 48 pasos temporales anuales.

BASES DE DATOS

Los datos de las variables de campo del ensayo (rendimiento en grano de sorgo, rendimiento en grano de trigo, COS, fertilización nitrogenada) fueron obtenidos personalmente con los responsables del ensayo en el INIA. Las variables o datos que sólo se encontraban en documentos originales fueron digitalizados en planillas de cálculo. Los datos de las variables climáticas locales (precipitación y evaporación) fueron obtenidas de las bases de datos online de las estaciones climáticas del INIA (2010). Las series de datos para los índices del ENOS (Niño 3,4) fueron obtenidas de las páginas de internet del NOAA (2010).

Para el análisis se seleccionaron las variables de producción de dos cultivos, trigo y sorgo, por ser los dos cultivos con más siembras de invierno y verano en el ensayo, respectivamente. Tanto estas variables como la fertilización nitrogenada y el COS presentan una observación por año durante todo el período de duración del ensayo, con la excepción de los datos faltantes ocasionales por dificultades en la toma del dato. En el caso del sorgo, se utilizaron solo los datos de las siembras de primera, es decir las siembras donde la parcela no venía de un cultivo en la estación inmediatamente anterior y por lo tanto se sembraban de forma temprana.

Para las variables climáticas locales se obtuvieron datos diarios desde 1965, los cuales fueron agregados a dos escalas distintas: escala anual y escala mensual, para cada año y cada mes de todo el período de estudio. Ambas variables se agregaron temporalmente mediante la suma total a cada escala. La evaporación es el registro directo y simple del agua que se evapora diariamente de un tanque de agua abierto de dimensiones estándar clase “A” (e.g. Howell et al. 1983).

ANÁLISIS DE DATOS

Se analizaron los datos de productividad de cultivos y clima entre 1965 y 2007, período en el cual se contaba con la información climática completa. Se revisaron los casos de datos faltantes en todas las variables y de ser necesario se corroboraron con los registros originales del archivo en papel.

Se realizaron análisis de datos exploratorios para identificar las variables predictivas más relevantes en cada especie. La construcción crítica de modelos mediante la adición paso a paso de variables consiste en gran parte en la selección variables predictivas apropiadas (Shipley 2000). La inclusión de demasiadas variables puede llevar a la construcción de un modelo que tiene bajo poder de predicción, alto sobreajuste y multicolinealidad, por lo tanto difícil de interpretar y vulnerable a inferencias erróneas (Neter et al. 1996; Sheather 2009). Por este motivo se seleccionaron las variables precipitación y evaporación como variables climáticas a analizar. Esta última, es una medida de evaporación directa que depende de la temperatura, la radiación solar, el viento y la humedad del aire (Penman 1948 y datos de este estudio), por lo que es representativa de las condiciones ambientales a las que están expuestas las plantas y puede ser tomada como una estimación de la evapotranspiración potencial (Sentelhas y Folegatti 2003). A partir de este conocimiento se evitó incluir las variables de temperatura, ya que están íntimamente relacionadas con la evaporación, para prevenir colinealidad. Además de las variables climáticas, se incluyeron entre las variables independientes candidatas a ser retenidas en los modelos el carbono del suelo, el año de cosecha (como aproximación de las tendencias tecnológicas existentes en este tipo de datos históricos) y el tratamiento de rotación, con el objetivo de dar cuenta de la variación generada por estos factores no climáticos. La variable de tipo de rotación se ingresó como una variable categórica con los tratamientos originales del ensayo reagrupados por un consenso entre tipo de rotación (i.e. agricultura continua sin fertilización [sistema 1], agricultura continua con fertilización [sistema 2 y 6], agricultura en rotación con 33% del tiempo en pasturas [sistema 7], agricultura en rotación con 50% del tiempo en pasturas [sistema 3 y 5] y agricultura en rotación con un 66% del tiempo en pastura [sistema 4]) y por la clasificación realizada mediante análisis de varianza y posteriores pruebas de Tukey pareadas, para detectar los sistemas que eran significativamente diferentes en sus medias.

Se realizaron regresiones simples por separado entre el rendimiento de cada especie de cultivo y cada variable explicativa candidata. Las variables de rendimiento de trigo y sorgo fueron transformadas con la función logaritmo en base 10 para estabilizar su varianza (Underwood 1997). Las variables candidatas incluyeron a las sumas o medias mensuales de las variables climáticas para cada mes de la estación de crecimiento de la

especie. Dado que frecuentemente las relaciones funcionales entre las variables climáticas y el rendimiento no son lineales (i.e. las precipitaciones muy bajas y muy altas disminuyen en rendimiento), para ellas se realizaron regresiones polinómicas de segundo orden de la forma: $Y_c = \beta_0 X_c + \beta_1 X_c^2 + \varepsilon_c$

donde Y_c es el rendimiento de la especie c, X_c es la variable climática, β_0 y β_1 son los coeficientes de regresión y ε_c es el término de error. El poder explicativo de las regresiones con cada variable candidata fue evaluado por la exploración visual de la curva de regresión, el coeficiente de determinación, la distribución de los residuos y la significancia estadística de cada término en el caso de las regresiones polinómicas. Por último se realizaron matrices de correlación entre las variables seleccionadas para descartar variables muy correlacionadas (r>0.8; Neter et al. 1996; Sheather 2009) y evitar colinealidad en el modelo final.

En base a los análisis exploratorios anteriores se evaluaron modelos empíricos para sintetizar los efectos de la variabilidad climática, el COS, el año de cosecha y el tratamiento de rotación, sobre cada especie. Basado en el análisis exploratorio descrito anteriormente se seleccionaron las variables más importantes para cada especie de cultivo y se realizaron regresiones múltiples con estas variables como explicativas. Para estas regresiones se depuraron los datos eliminando los casos con datos faltantes para algunas de las variables independientes. Posteriormente se realizaron procedimientos automatizados de selección de modelos mediante la adición y extracción paso a paso de variables. Se incluyeron como términos posibles las interacciones dobles entre las variables seleccionadas. Para esto se utilizó la función automatizada de construcción y comparación de modelos (*step*) utilizando el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike 1974) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC, Schwarz 1978) que es una modificación del primero que penaliza más fuertemente el número de parámetros del modelo (Schwarz 1978; Yang 2005). Estos criterios consideran tanto ajuste como simplicidad y parsimonia para evitar problemas de sobreajuste (Ginzburg y Jensen 2004). Para seleccionar el modelo final se usaron los mismos criterios (AIC y BIC) y el coeficiente de determinación ajustado (r^2 aj.) por el número de parámetros del modelo. En caso de discordancia entre los criterios se prefirió el indicado por BIC justamente con el objetivo de seleccionar modelos lo más simples posibles.

La codificación utilizada para abreviar el nombre de las variables en figuras y tablas de esta tesis se presenta en la tabla 2.

Para todos los análisis se utilizó el paquete estadístico R (R Development Core Team 2011).

Tabla 2. Codificación utilizada para abreviar los nombres de las variables en figuras y tablas y las unidades en que se presentan los valores de cada una de ellas.

abreviatura	variable	unidades
año	año de cosecha	años
Sorgo	rendimiento de grano de sorgo	kg/ha
Trigo	rendimiento de grano de trigo	kg/ha
COS	carbono orgánico del suelo	%
grupt	reagrupación de tratamientos	--
fertc	fertilización nitrogenada	kg/ha
EN 3,4	valor de diciembre del índice de El Niño 3,4	--
evap	evaporación diaria media anual	mm
prec	precipitación total anual	mm
evaptxxx	evaporación total mensual (xxx= primeras tres letras del mes e.g. evaptene = evaporación total del mes de enero)	mm
prectxxx	precipitación total mensual (xxx= primeras tres letras del mes e.g. prectene = precipitación total del mes de enero)	mm

RESULTADOS

Luego de la exploración de la base de datos y la depuración de valores faltantes se obtuvo una serie de datos de 114 y 276 observaciones para el rendimiento de sorgo y trigo, respectivamente. En la tabla 3 y 4 se observa un resumen de las características de las variables utilizadas para los análisis de ambos cultivos. Se puede notar alta variación en las variables, observándose gran rango de variación en muchas de ellas. En la tabla 5 se presentan las reagrupaciones de los tratamientos para los dos cultivos. En el caso del sorgo los sistemas 4 y 7 se eliminaron del análisis debido a que el número de observaciones en estos sistemas era muy reducido y provocaba un gran desbalance con respecto a los otros sistemas. Todas las reagrupaciones coincidieron con la clasificación de sistemas por fertilización y tiempo de pasturas en la rotación excepto por el sistema 2 y 6 en el trigo que fueron encontrados significativamente diferentes por los análisis de varianza.

Tabla 3. Resumen de las variables continuas analizadas para el cultivo de sorgo donde se puede observar la media y rango de cada una de ellas.

	Sorgo	COS	fertc	prectene	prectfeb	prectmar	evaptene	evaptfeb	evaptmar	prec	evap	EN 3,4
	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Mínimo	598	1.05	0	23	37	30	226	165	124	854	4.2	-2.6
Media	3849	1.79	29	87	98	126	281	216	178	1151	5.0	0.8
Máximo	12229	2.42	135	205	284	442	357	253	253	1521	5.8	3.5

Tabla 4. Resumen de las variables continuas analizadas para el cultivo de trigo donde se puede observar la media y rango de cada una de ellas.

	Trigo	COS	fertc	prectjul	prectago	prectset	prectoct	prectnov	prectdic	evaptjul	evaptago	evaptoset	evaptoct	evaptnov	evaptdic	prec	evap	EN 3,4
	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Mín.	350	0.90	0	8	6	5	14	24	10	39	57	88	97	151	162	754	4.2	-2.6
Media	1836	1.83	32	84	61	82	111	112	101	65	90	123	158	201	261	1122	5.0	0.1
Máx.	4352	2.35	156	193	178	244	290	180	275	117	126	155	208	284	419	1521	5.8	3.5

Tabla 5. Reagrupaciones de los tratamientos originales del ensayo con distintos sistemas de rotación para los análisis de los rendimientos de trigo y de sorgo.

	Nuevas agrupaciones	
Sistema	Sorgo	Trigo
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	-	4
5	3	3
6	2	6
7	-	4

ANÁLISIS EXPLORATORIO

Sorgo

De los análisis de regresiones con cada variable candidata por separado se identificaron algunas variables con asociación clara con el rendimiento de los cultivos. En la figura 1 y tabla 6 se resumen los resultados de las regresiones exploratorias realizadas con el rendimiento de sorgo como variable de respuesta. De las 18 regresiones realizadas 10 fueron estadísticamente significativas (Tabla 6). Entre estas la precipitación y la evaporación de enero fueron las que explicaron más varianza en el rendimiento de sorgo ($r^2 \sim 0.25$), seguidas de la agrupación de tratamientos, la evaporación de febrero, la precipitación de marzo, la evaporación anual y el carbono orgánico del suelo, en ese orden decreciente de coeficiente de determinación. Las regresiones con evaporación de febrero y precipitación de marzo resultaron cuadráticas (Tabla 6). En el caso de esta última, el resultado parece bastante afectado por años con gran precipitación que tienen gran influencia sobre la regresión y por lo tanto no es muy sólido. En el caso de la evaporación de enero y la evaporación anual el modelo cuadrático fue estadísticamente significativo pero tanto los coeficientes de determinación como la prueba t para los términos cuadráticos de la regresión y la exploración visual de las curvas permitieron concluir que este no era mejor que el modelo lineal. Por esta razón en estos casos se seleccionaron los modelos lineales. En general todas las regresiones presentaron un bajo coeficiente de determinación debido a que existe gran varianza posiblemente causada por las demás variables explicativas que no se están tomando en cuenta en cada regresión.

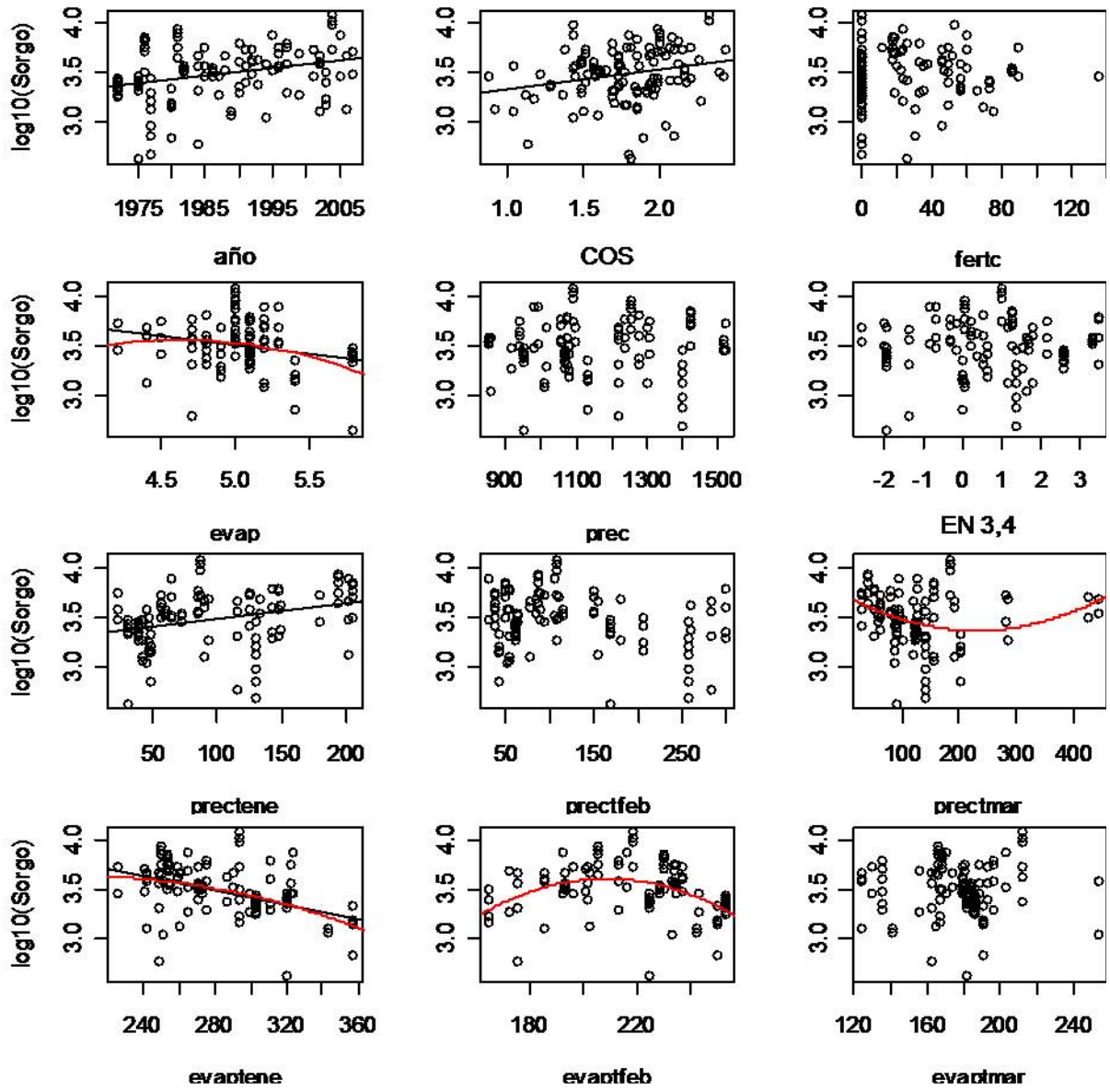

Figura 1- Relación entre el rendimiento en grano de sorgo en función de todas las potenciales variables explicativas. Para los modelos que fueron estadísticamente significativos se muestra la curva de la ecuación de regresión, tanto para los lineales (línea negra) como los cuadráticos (línea roja).

El rendimiento de sorgo aumentó con el año de siembra, con el COS. y la precipitación de enero y disminuyó con la evaporación del mismo mes. La evaporación de febrero tuvo una relación cuadrática con concavidad negativa y el máximo dentro del rango de observación, por lo que la pendiente presentó un cambio de signo dentro del mismo. La

Tabla 6 – Significancia estadística y coeficientes de determinación de los modelos de regresión lineal y cuadrática del rendimiento de sorgo en función de cada variable explicativa potencial.

		p valor Pr(> t)		p (prueba de F)	r^2	r^2 aj.	N
variable explicativa	modelo	término lineal	término cuadrático	modelo global			
precipitación enero	y= a+bx	**< 0.001**		**< 0.001**	0.26	0.25	114
evaporación enero	$y= a+bx+cx^2$	0.424	0.255	**< 0.001**	0.26	0.24	107
evaporación enero	y= a+bx	**< 0.001**		**< 0.001**	0.25	0.24	107
tratamientos agrupados 2	y= a+bx	**0.002**		**< 0.001**	0.25	0.23	114
3		**< 0.001**					
evaporación febrero	$y= a+bx+cx^2$	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	0.22	0.20	101
precipitación marzo	$y= a+bx+cx^2$	**0.001**	**0.001**	**0.004**	0.11	0.09	114
año	y= a+bx	**0.001**		**0.001**	0.09	0.08	114
evaporación anual	$y= a+bx+cx^2$	0.144	0.110	**0.014**	0.09	0.07	96
evaporación anual	y= a+bx	**0.015**		**0.015**	0.06	0.05	96
C orgánico del suelo	y= a+bx	**0.010**		**0.010**	0.06	0.05	114
precipitación febrero	$y= a+bx+cx^2$	0.506	0.241	0.102	0.05	0.03	114
precipitación febrero	y= a+bx	0.074		0.074	0.03	0.02	114
precipitación anual	y= a+bx	0.516		0.516	<0.01	< 0.01	110
precipitación marzo	y= a+bx	0.455		0.455	0.01	< 0.01	114
evaporación marzo	$y= a+bx+cx^2$	0.531	0.447	0.480	0.02	< 0.01	107
El niño 3,4 (diciembre)	y= a+bx	0.921		0.921	< 0.01	< 0.01	114
evaporación marzo	y= a+bx	0.797		0.797	< 0.01	< 0.01	107
fertilización N	y= a+bx	0.972		0.972	< 0.01	< 0.01	105

relación del rendimiento con la precipitación de marzo también fue cuadrática y con el máximo dentro del rango de observaciones pero en este caso con concavidad positiva. Por último, la fertilización nitrogenada y el índice del ENOS no tuvieron una relación significativa con el rendimiento de grano de sorgo.

Trigo

Para la variable rendimiento de grano de trigo se realizaron 23 regresiones de las cuales 16 fueron estadísticamente significativas y una (fertilización N) presentó una regresión cuantil significativa para el percentil 10 ($p<0.05$, IC 95% [0.00446, 0.00486]) (Figura 2). Los resultados de las restantes regresiones se pueden encontrar en la tabla 7. La variable agrupación de tratamientos fue la que más varianza en el rendimiento explicó

($r^2 \sim 0.43$) seguidos por la precipitación de diciembre, la evaporación de julio, el COS, el año y la evaporación de octubre. Menos varianza explicaron varias evaporaciones y precipitaciones mensuales y la precipitación anual. Las regresiones con precipitación de diciembre, evaporación de julio, evaporación de octubre, precipitación de noviembre y precipitación de setiembre resultaron ser significativas con un modelo cuadrático (Tabla 7). En el caso de la precipitación de octubre y la precipitación anual el modelo cuadrático fue estadísticamente significativo pero tanto los coeficientes de determinación como la prueba t para los términos cuadráticos de la regresión y la exploración visual de las curvas permitieron concluir que éste no era mejor que el modelo lineal. Las regresiones del rendimiento de trigo en función de la precipitación de setiembre y de diciembre se ajustaron a un modelo cuadrático de concavidad negativa y máximo dentro del rango de observación por lo que el rendimiento de trigo aumentó con la precipitación en rangos bajos y disminuyó en los rangos altos de precipitación (Figura 2 y Tabla 7). Las regresiones con las precipitaciones de octubre y noviembre se ajustaron a un modelo lineal con pendiente negativa por lo que el rendimiento de trigo disminuyó con el aumento de la precipitación en todo el rango observado de precipitaciones (Figura 2 y Tabla 7). La mayoría de las regresiones presentaron un bajo coeficiente de determinación (menores que los observados para sorgo) y alta varianza de los residuos (Figura 2 y Tabla 7).

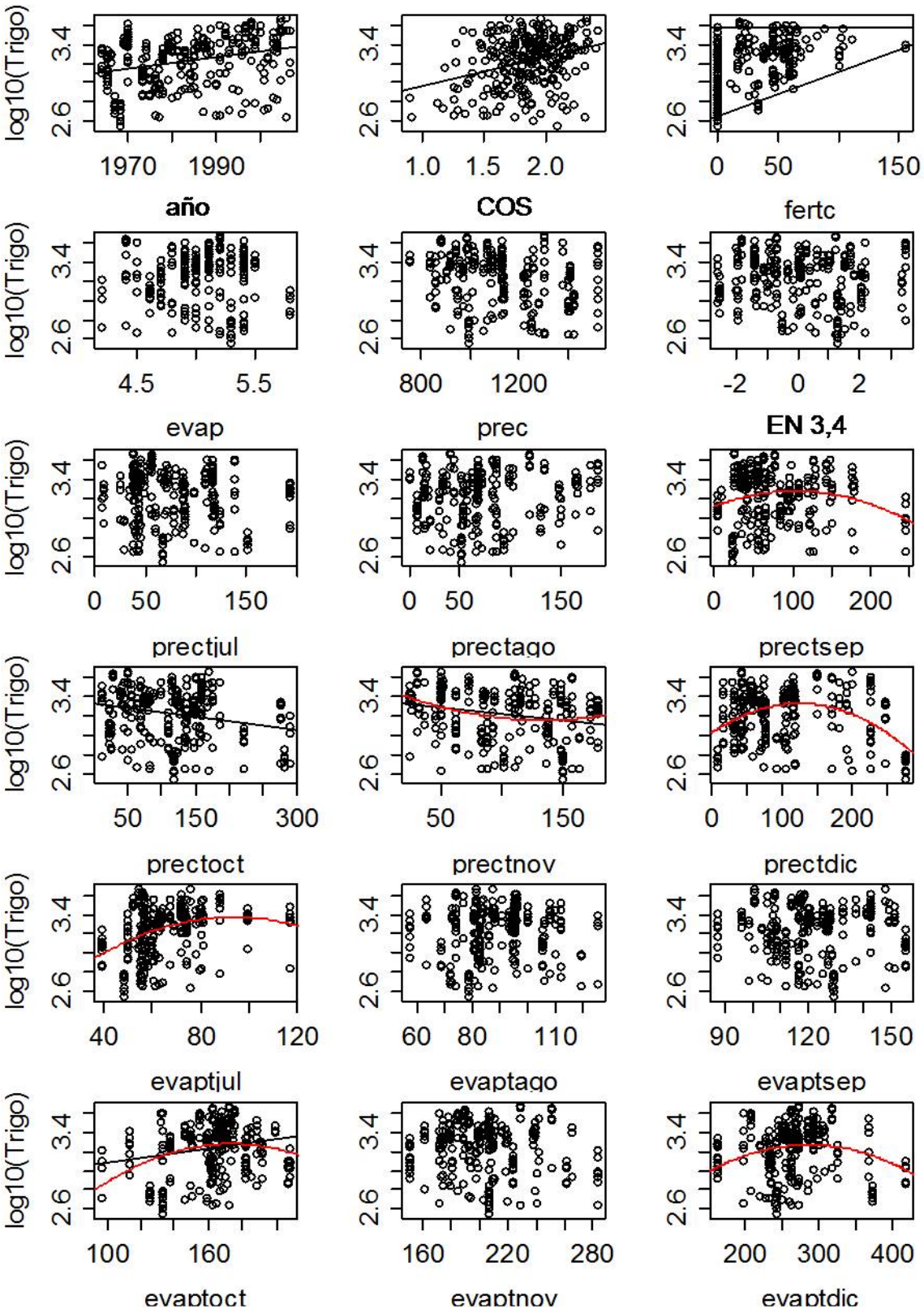

Figura 2 – Relación entre rendimiento en grano de trigo en función de todas las potenciales variables explicativas. Para los modelos que fueron estadísticamente significativos se muestra la curva de la ecuación de regresión, tanto para los lineales (línea negra) como los cuadráticos (línea roja). En el caso de la regresión con fertilización las líneas corresponden a las regresiones con los cuantiles 10% (inferior) y 90% (superior) del rendimiento.

Tabla 7 – Significancia estadística y coeficientes de determinación de los modelos de regresión lineal y cuadrática del rendimiento de trigo en función de cada variable explicativa candidata.

		p valor Pr(> t)		p (prueba de F)	r^2	r^2 aj.	N
variable explicativa	modelo	término lineal	t. cuadrático	modelo global			
tratamientos agrupados 2		**< 0.001**		**< 0.001**	0.43	0.42	276
6		**< 0.001**					
4		**< 0.001**					
3		**< 0.001**					
precipitación diciembre	$y= a+bx+cx^2$	**< 0.001**	**< 0.001**	**< 0.001**	0.15	0.14	270
evaporación julio	$y= a+bx+cx^2$	**< 0.001**	**0.001**	**< 0.001**	0.13	0.12	259
C orgánico del suelo	$y= a+bx$	**< 0.001**		**< 0.001**	0.10	0.10	259
evaporación julio	$y= a+bx$	**< 0.001**		**< 0.001**	0.09	0.09	259
año	$y= a+bx$	**< 0.001**		**< 0.001**	0.09	0.08	276
evaporación octubre	$y= a+bx+cx^2$	**< 0.001**	**0.001**	**< 0.001**	0.08	0.07	259
precipitación noviembre	$y= a+bx+cx^2$	**0.004**	**0.027**	**< 0.001**	0.06	0.06	256
precipitación octubre	$y= a+bx+cx^2$	0.604	0.082	**< 0.001**	0.06	0.05	270
precipitación octubre	$y= a+bx$	**< 0.001**		**< 0.001**	0.05	0.04	270
precipitación anual	$y= a+bx+cx^2$	0.167	0.283	**0.002**	0.05	0.04	248
precipitación anual	$y= a+bx$	**0.001**		**0.001**	0.05	0.04	248
precipitación noviembre	$y= a+bx$	**0.001**		**0.001**	0.05	0.04	256
precipitación setiembre	$y= a+bx+cx^2$	**0.001**	**0.001**	**0.003**	0.04	0.04	270
evaporación octubre	$y= a+bx$	**0.001**		**0.001**	0.04	0.04	259
precipitación agosto	$y= a+bx+cx^2$	0.627	0.245	0.061	0.02	0.01	270
precipitación agosto	$y= a+bx$	**0.040**		**0.040**	0.02	0.01	270
precipitación julio	$y= a+bx$	0.072		0.072	0.01	0.01	270
evaporación anual	$y= a+bx+cx^2$	0.056	0.059	0.145	0.02	0.01	237
precipitación julio	$y= a+bx+cx^2$	0.610	0.978	0.198	0.01	< 0.01	270
El niño 3,4 (diciembre)	$y= a+bx$	0.304		0.304	< 0.01	< 0.01	276
evaporación anual	$y= a+bx$	0.592		0.592	< 0.01	< 0.01	237

Las regresiones con las evaporaciones de julio, octubre y diciembre se ajustaron a modelos cuadráticos de concavidad negativa. Las de octubre y diciembre presentaron un cambio de pendiente marcado mientras que en la evaporación de julio el máximo de la curva de regresión se encontró muy próximo al máximo de evaporación observado por lo que la pendiente fue positiva u horizontal durante la mayor parte del rango de las observaciones. El rendimiento de trigo aumentó significativamente y linealmente con el transcurso de los años y al aumentar el COS, aunque con una gran varianza alrededor de

la recta ajustada para la regresión. La relación del rendimiento de trigo con la fertilización nitrogenada presentó una estructura que no se ajustaba a una regresión lineal, dónde la fracción de observaciones que corresponden al percentil del 10% inferior aumentaron significativamente al aumentar la fertilización mientras que la fracción del percentil 90% no varió con la misma. Es decir que el mínimo rendimiento de trigo aumentó con la fertilización nitrogenada pero no así el máximo rendimiento. El rendimiento de trigo no presentó relación con el índice ENOS 3,4.

MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Sorgo

A partir de los análisis exploratorios y mediante la adición paso a paso de variables explicativas se construyeron siete modelos de regresión múltiple para el rendimiento de sorgo (Tabla 8). Estos incluyeron entre cinco y 13 parámetros y presentaron un coeficiente de determinación ajustado de entre 0.45 y 0.70. El modelo priorizado tanto por el criterio AIC como por BIC como el que mejor se ajusta a los datos de rendimiento de sorgo (modelo 6, tabla 8) posee un coeficiente de determinación ajustado de 0.70, fue estadísticamente significativo ($F_{(9,\ 67)}$ = 20.29; $p<0.001$) y todos sus términos fueron significativos (Tabla 8). Este modelo incluyó información de tres variables climáticas: precipitación de enero, evaporación de febrero, evaporación de marzo y de tres variables no climáticas: año, agrupación de tratamientos y COS. La evaporación de marzo es la única variable que no había sido identificada con una regresión estadísticamente significativa con el rendimiento de sorgo en los análisis exploratorios. Las demás variables son las mismas identificadas con regresiones significativas en los análisis exploratorios. La variable evaporación de febrero mantuvo la relación funcional encontrada en los análisis exploratorios, es decir una relación cuadrática con concavidad negativa. El rendimiento aumentó con el año de cosecha linealmente. El rendimiento de la agrupación de tratamientos 2 fue significativamente distinto de la 1, mientras que el de la 3 no lo fue. O sea que el tratamiento de agricultura continua sin fertilización fue significativamente distinto de las demás agrupaciones sin importar la presencia de pasturas en la rotación. La evaporación de marzo mostró una relación cuadrática de concavidad negativa. Las variables precipitación de enero y carbono orgánico del suelo solo se encontraron representadas en el modelo a modo de interacciones: una

interacción positiva entre la precipitación de enero y el COS y una negativa entre la precipitación de enero y la evaporación de marzo. A su vez, resultó significativo el término de interacción positiva entre la evaporación de febrero y la evaporación de marzo.

Trigo

Se construyeron cinco modelos de regresión múltiple para el caso la variable de respuesta rendimiento de trigo que se presentan en la tabla 9. Estos poseen entre 14 y 23 parámetros y un coeficiente de determinación ajustado de entre 0.73 y 0.80. El criterio de AIC y BIC discordaron en el modelo priorizado y por lo tanto se seleccionó el priorizado por BIC (modelo 2, tabla 9). El modelo posee un coeficiente de determinación ajustado de 0.80, es válido estadísticamente ($F_{(15,\ 155)} = 47.72$; $p<0.001$) y todos sus términos fueron estadísticamente significativos (Tabla 9). Este modelo incluyó entre las variables explicativas 10 variables climáticas, nueve locales: evaporación y precipitación de julio, evaporación y precipitación de setiembre, evaporación y precipitación de octubre, precipitación de noviembre y precipitación de diciembre; y una regional, el índice de ENOS. También incluyó información de una única variable no climática, la agrupación de tratamientos. La precipitación de julio, las evaporaciones de setiembre y noviembre y el índice de ENOS no habían sido identificadas con regresiones estadísticamente significativas con el rendimiento de trigo en los análisis exploratorios. Algunas, pero no todas las variables mantuvieron la relación funcional ajustada en los análisis exploratorios. El rendimiento de trigo disminuyó linealmente al aumentar el índice de ENOS, o sea que en años donde dominó la fase "El Niño", más húmedos, el rendimiento de trigo tendió a reducirse. El rendimiento también tendió a disminuir linealmente con el aumento de la evaporación de setiembre y la precipitación de noviembre. Por otro lado, el rendimiento de grano de trigo tuvo una relación lineal positiva con la evaporación de julio y precipitación de setiembre. La evaporación y precipitación de octubre, evaporación de noviembre y precipitación de diciembre se incluyeron en el modelo con una relación cuadrática de concavidad negativa. El modelo descripto anteriormente para describir la productividad del trigo no incluyó términos de interacción entre las variables explicativas.

Tabla 8 –Coeficientes de regresión y significancia (significativos en gris y negrita) para todas las variables de los modelos de regresión múltiple construidos para el rendimiento de sorgo (con transformación logarítmica). El modelo 6 fue el seleccionado (recuadro enfatizado).

Modelo		intercepto	evaptene	evaptfeb	evaptfeb2	evaptmar	evaptmar 2	prectene	prectmar	prectmar2	grupt		año	Corg
											2	3		
1	Coef. de regresión	-25.6	-0.003	0.070	-2E-04	0.032	-9E-05		0.002	-4E-06	0.122	0.015	0.009	0.374
	p(>t)	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**		**0.001**	**0.018**	**0.007**	0.852	**<0.001**	**<0.001**
2	Coef. de regresión	-22.5		0.051	-1E-04	0.014	-4E-05	0.001			0.138	0.066	0.009	0.287
	p(>t)	**<0.001**		**<0.001**	**0.001**	**0.037**	0.051	**0.001**			**0.005**	0.439	**<0.001**	**0.011**
3	Coef. de regresión	-18.4		0.054	-1E-04			0.001			0.127	0.043	0.008	0.341
	p(>t)	**<0.001**		**<0.001**	**<0.001**			**0.003**			**0.011**	0.613	**0.002**	**0.003**
4	Coef. de regresión	-12.1				0.002		0.002					0.007	0.369
	p(>t)	**0.003**				**0.014**		**<0.001**					**0.001**	**<0.001**
5	Coef. de regresión	-11.2						0.002					0.007	0.392
	p(>t)	**0.008**						**<0.001**					**0.001**	**<0.001**
6	Coef. de regresión	-24.8		0.044	-2E-04		-1E-04				0.110	0.005	0.012	
	p(>t)	**<0.001**		**0.001**	**<0.001**		**<0.001**				**0.009**	0.938	**<0.001**	
7	Coef. de regresión	-14.3		0.051	-1E-04						0.182	0.220	0.006	
	p(>t)	**0.002**		**<0.001**	**0.001**						**<0.001**	**<0.001**	**0.011**	

Tabla 8 (continuación) – Coeficientes de regresión y significancia (significativos en gris y negrita) para todos los términos

de interacción y nº de parámetros (df), número de observaciones(N), r^2 ajustado, valor de AIC y BIC y significancia de los modelos de regresión múltiple construidos para el rendimiento de sorgo (con transformación logarítmica). El modelo 6 fue el seleccionado (recuadro enfatizado).

Modelo		prectene:Corg	prectene:evaptmar	evaptfeb:evaptmar	df	N	r^2 aj	AIC	BIC	p(>F)
1	Coef. de regresión				13	77	0.68	-72.9	-42.4	**3E-14**
	p(>t)									
2	Coef. de regresión				11	77	0.61	-59.1	-33.3	**2E-12**
	p(>t)									
3	Coef. de regresión				9	77	0.59	-57.2	-36.1	**1E-12**
	p(>t)									
4	Coef. de regresión				6	77	0.49	-43.5	-29.5	**8E-11**
	p(>t)									
5	Coef. de regresión				5	77	0.45	-39.0	-27.3	**3E-10**
	p(>t)									
6	Coef. de regresión	0.004	-4E-05	2E-04	11	77	**0.70**	**-78.8**	**-53.0**	**6E-16**
	p(>t)	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**						
7	Coef. de regresión	0.001			8	77	0.56	-53.7	-35.0	**4E-12**
	p(>t)	**<0.001**								

Tabla 9 – Coeficientes de regresión y significancia (significativos en gris y negrita) para todas las variables de los modelos de regresión múltiple construidos para el rendimiento de trigo (con transformación logarítmica). El modelo 2 fue el seleccionado (recuadro enfatizado).

Modelo		intercepto	grupt				año	Corg	decpuntual	evaptjul	prectjul	prectjul2	evaptset	prectset	prectset2	evaptoct2	prectoct	prectoct2	evaptnov2	prectnov	prectdic	prectdic2
			2	6	4	3																
1	Coef. de regresión	-7.876	0.287	0.324	0.305	0.351	0.005	0.166		0.003				0.004	-2E-05					-0.001	0.005	-2E-05
	p(>t)	**0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**0.007**		**<0.001**				**<0.001**	**<0.001**					**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**
2	Coef. de regresión	3.552	0.299	0.359	0.386	0.433			-0.056	0.005		5E-06	-0.003	6E-04		-4E-06		-4E-06	-9E-06	-0.003	0.004	-1E-05
	p(>t)	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**			**<0.001**	**<0.001**		**<0.001**	**<0.001**	**0.009**		**<0.001**		**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**
3	Coef. de regresión	-5.240	0.280	0.317	0.308	0.339	0.004	0.157	-0.050	0.004	8E-04		-0.002	0.002	-7E-06	-3E-06	0.001	-7E-06	-7E-06	-0.002	0.004	-1E-05
	p(>t)	**0.033**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**0.003**	**<0.001**	**<0.001**	**0.004**		**0.002**	**0.004**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**
4	Coef. de regresión	8.976	-18.010	-18.550	-3.765	-4.233	-0.003	0.273		0.007				-0.060	-2E-05					-0.002	0.003	-2E-05
	p(>t)	0.071	**<0.001**	**<0.001**	0.585	0.563	0.167	0.038		**<0.001**				0.166	**<0.001**					0.398	0.017	**<0.001**
5	Coef. de regresión	6.213	-19.300	-19.270	-8.012	-9.480	-0.002	0.146		0.006				0.003	**<0.001**					-0.004	0.004	-1E-05
	p(>t)	0.158	**<0.001**	**<0.001**	0.240	0.189	0.381	0.028		**<0.001**				0.025	**<0.001**					**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**

Tabla 9 (continuación) – Coeficientes de regresión y significancia (significativos en gris y negrita) para todos los términos de interacción y nº de parámetros (df), número de observaciones (N), r^2 ajustado, valor de AIC y BIC y significancia de los modelos de regresión múltiple construidos para el rendimiento de trigo (con transformación logarítmica). El modelo 2 fue el seleccionado (recuadro enfatizado).

Modelo		prectnov:prectset	grupt2:año	grupt3:año	grupt4:año	grupt5:año	evaptjul:prectset	año:prectset	prectnov:Corg	prectdic:Corg	df	N	r^2 aj.	AIC	BIC	p (>F)
1	Coef. de regresión										14	171	0.73	-175	-131	< **2e-16**
	p(>t)															
2	Coef. de regresión										17	171	**0.80**	-228	**-175**	< **2e-16**
	p(>t)															
3	Coef. de regresión										21	171	0.79	**-235**	-169	< **2e-16**
	p(>t)															
4	Coef. de regresión	4E-05	0.009	0.010	0.002	0.002	-8E-05	3E-05	-2E-03	9E-04	23	171	0.79	-213	-141	< **2e-16**
	p(>t)	<**0.001**	<**0.001**	<**0.001**	0.552	0.529	<**0.001**	0.148	0.066	0.105						
5	Coef. de regresión	4E-05	0.010	0.010	0.004	0.005	-6E-05				20	171	0.79	-209	-147	< **2e-16**
	p(>t)	<**0.001**	<**0.001**	<**0.001**	0.222	0.172	0.005									

DISCUSIÓN

El análisis del ensayo de largo plazo permitió determinar una asociación importante entre las variables climáticas y la productividad, tanto para trigo como para sorgo. Esta asociación se dio con diversas variables, locales y regionales, y con diferentes relaciones funcionales para cada cultivo y variable explicativa. Este efecto del clima se pudo observar tanto en los análisis exploratorios como en los modelos de regresión múltiple. Esto concuerda con muchos trabajos que han encontrado al clima como uno de los principales determinantes de la productividad de cultivos (Fisher 1925; Peacock 1975; Cane et al. 1994; Stige et al. 2006). También se encontraron relaciones entre variables no climáticas y el rendimiento.

Sorgo

En el caso del sorgo se encontraron fuertes asociaciones entre variables climáticas locales y la productividad del cultivo. Las variables climáticas locales de enero fueron las más correlacionadas con la productividad, explicando cada una de ellas por separado un cuarto de la varianza en el rendimiento. Esto sugiere que enero sería un mes clave en determinar las condiciones para la productividad del cultivo. También presentaron una regresión significativa y clara con la variable evaporación de febrero. Entre las variables no climáticas que presentaron mayor coeficiente de determinación con el rendimiento del sorgo se encuentran la agrupación de tratamientos, el año de cosecha y el COS. La tendencia temporal de largo plazo del rendimiento (vs. año de cosecha) es algo frecuente en cultivos y se interpreta como el aumento de los rendimientos con los cambios tecnológicos, en el uso de variedades genéticas, herramientas de control químico de malezas y enfermedades, entre otros (Lobell y Asner 2003; Stige et al. 2006; Lobell et al. 2007). Los mecanismos por los cuales la productividad aumenta con el COS están relacionados con todas las características físicas, químicas y biológicas del suelo que se asocian con el COS y promueven el crecimiento vegetal (e.g. estructura física, ciclado de nutrientes, retención de agua, etc.; Magdoff y Weil 2004; Brady y Weil 2009). Dos variables frecuentemente citadas como determinantes de la productividad de cultivos, como el índice de ENOS (Baethgen 1998a; Podestá et al. 1999) y la fertilización nitrogenada, no fueron estadísticamente significativas. Esto podría explicarse

principalmente porque en estas regresiones exploratorias existe varianza de muchos factores no tomados en cuenta que pueden enmascarar los efectos de estas variables sobre el rendimiento. En el caso del ENOS además se conoce que sus efectos sobre la precipitación y los cultivos no son directamente proporcionales a los índices de temperaturas oceánicas, por lo que quizás otro tipo de análisis sería necesario para detectarlo (e.g. Roel y Baethgen 2004). Por otro lado, es conocido que el ENOS en Uruguay tiene efectos sobre las condiciones climáticas en primavera y verano temprano y en otoño (Pisciottano et al. 1994; Díaz et al. 1998a), por lo que podría no afectar tanto en el mes de enero que es el más crítico para este cultivo como se corrobora en este estudio.

La mayoría de estas relaciones funcionales encontradas en las regresiones exploratorias se ven representadas en el modelo final construido mediante regresiones múltiples para el rendimiento de sorgo (modelo 6, Tabla 8). La evaporación de febrero tiene una relación cuadrática con la productividad involucrando un cambio de pendiente. La relación positiva no es fácilmente interpretable pero quizás podría deberse a un efecto promotor de la radiación o más probablemente de la temperatura en un rango de evaporación donde el déficit hídrico todavía no es importante. Esta interpretación es sustentada por las altas temperaturas requeridas por esta especie para su óptimo crecimiento (25-30 ^{o}C durante el día; Loomis y Connor 1992). Igualmente este resultado y su interpretación requieren una profundización a futuro. La región de pendiente negativa podría explicarse por mecanismos asociados a la disponibilidad de agua en el suelo. Altas evaporaciones representan condiciones en las que aumenta la regulación de la evapotranspiración por parte de las plantas, reduciendo la fotosíntesis, sobre todo en condiciones de escasez de agua (Turner et al. 1985; Romero 2002; Chapin et al. 2004). A su vez la evaporación reduce directamente la disponibilidad de agua en el suelo por lo que estos dos mecanismos asociados a la variable evaporación están interrelacionados y podrían darse simultáneamente y potenciarse. Por el ciclo de cultivo de sorgo y las fechas de siembra usuales en Uruguay (Giménez y García Petillo 2011) y en este ensayo (datos no publicados) el mes de febrero estaría coincidiendo en la mayoría de los ciclos de cultivos estudiados con períodos posteriores a la antesis (llenado de grano). Si bien es conocida la capacidad del sorgo a tolerar períodos de seca (Lewis et al. 1974; Jordan y Miller 1980), períodos de estrés hídrico en estas etapas del crecimiento han demostrado

ser fuertemente perjudiciales para el rendimiento de grano de sorgo (Lewis et al. 1974; Begg y Turner 1976; Turner 1986). La relación del rendimiento con la evaporación de marzo también resultó ser cuadrática de concavidad negativa y con el máximo dentro del rango de observaciones lo que sugiere que su asociación con el rendimiento y los mecanismos implicados en ella son similares. En el mes de marzo comienza la senescencia de las hojas (Giménez y García Petillo 2011) y se ha reportado que condiciones de estrés hídrico en esta etapa acelera la reducción del área de hoja y disminuye el tamaño del grano (Abraha 1999). Adicionalmente, las evaporaciones de febrero y marzo interaccionan positivamente lo que puede denotar algún tipo de acumulación de impactos fisiológicos, como estrés hídrico.

Los análisis exploratorios mostraron la importancia de las variables climáticas del mes de enero sobre el rendimiento de sorgo. De éstas, únicamente la precipitación de enero fue incluida en el modelo completo de regresión múltiple e, interesantemente, fue incluida en un término de interacción con el COS y otro con la evaporación de marzo. Que el clima de este mes sea importante para el rendimiento del sorgo es apoyado por diversos conocimientos previos y de este estudio. En primer lugar enero es un mes con balance hídrico negativo en general en Uruguay y, en particular, en la estación experimental donde se encuentra el ensayo (Corsi 1982). Si utilizamos como una aproximación al balance hídrico la diferencia entre la precipitación y la evaporación de enero podemos observar en los datos utilizados en este estudio que esta diferencia es siempre negativa y es en promedio la más negativa de todos los meses estudiados (Tabla 3). Esto deja en claro que las relaciones observadas entre el rendimiento de sorgo y las variables climáticas de enero se pueden explicar por mecanismos asociados a la disponibilidad de agua en el suelo. Por otro lado, se ha reportado que la etapa de floración y los períodos inmediatamente anterior y posterior son los más susceptibles a déficits hídricos y determinantes del rendimiento de sorgo (Lewis et al. 1974; Eck y Musick 1979; Jordan y Miller 1980). En la mayoría de las siembras de sorgo en el sur del país la floración se da a mediados de enero por lo que los períodos mencionados también se dan en enero (Giménez y García Petillo 2011). De esta manera se explica la fuerte asociación de las variables climáticas que determinan el balance hídrico de enero con el rendimiento. La interacción negativa de la precipitación de enero con la evaporación de marzo podría estar reflejando que el efecto del déficit hídrico en marzo

en el período final de llenado de grano sería peor si hubo un efecto de déficit hídrico en el período de floración que podría haber reducido área de hoja o número de granos.

Más interesante es el hecho de que la variable precipitación de enero presentó interacción positiva con el COS. Por un lado, es claro que las precipitaciones son el aporte de agua al suelo. Por otro, se conoce bien la función del COS en mejorar diversas características del suelo relacionadas con la dinámica del agua en él y su disponibilidad y la de los nutrientes para las plantas. El COS determina características como la estructura física, agregación, porosidad y abundancia de microorganismos (incluyendo los simbióticos y benéficos para las plantas) del suelo, que a su vez definen su capacidad de retención de agua y qué acceso tienen las plantas a ella (De Jong et al. 1983; Magdoff y Weil 2004; Franzluebbers 2010). Por lo tanto es posible que la interacción entre precipitación y COS represente una única variable que representa la dinámica de la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas. EL COS estaría potenciando el efecto de la precipitación permitiendo una mayor retención y disponibilidad del agua y por lo tanto un uso más eficiente por parte de las plantas. Este resultado concuerda con el reportado por Díaz-Rosselló y colaboradores (2009) para el cultivo de trigo en el mismo ensayo, que indicaba una interacción entre un factor climático, construido a partir de desvíos de los residuales del modelo, y el COS. Sin embargo, en este caso la interacción es más concluyente ya que se da con una variable climática directamente y el COS está representado en el modelo únicamente mediante este término de interacción, por lo que este podría ser el mecanismo principal por el que influye sobre el rendimiento. El efecto de esta interacción sobre el rendimiento de sorgo se puede observar con claridad en la figura 3. Este hallazgo resalta la importancia de la conservación del suelo y su carbono orgánico. El carbono orgánico del suelo estaría jugando un rol en la modulación del efecto del clima sobre el rendimiento de cultivos. Esto sería importante en un contexto de adaptación al cambio climático. Lo planteado aquí permite afirmar que la hipótesis 2 se cumple para el cultivo de sorgo.

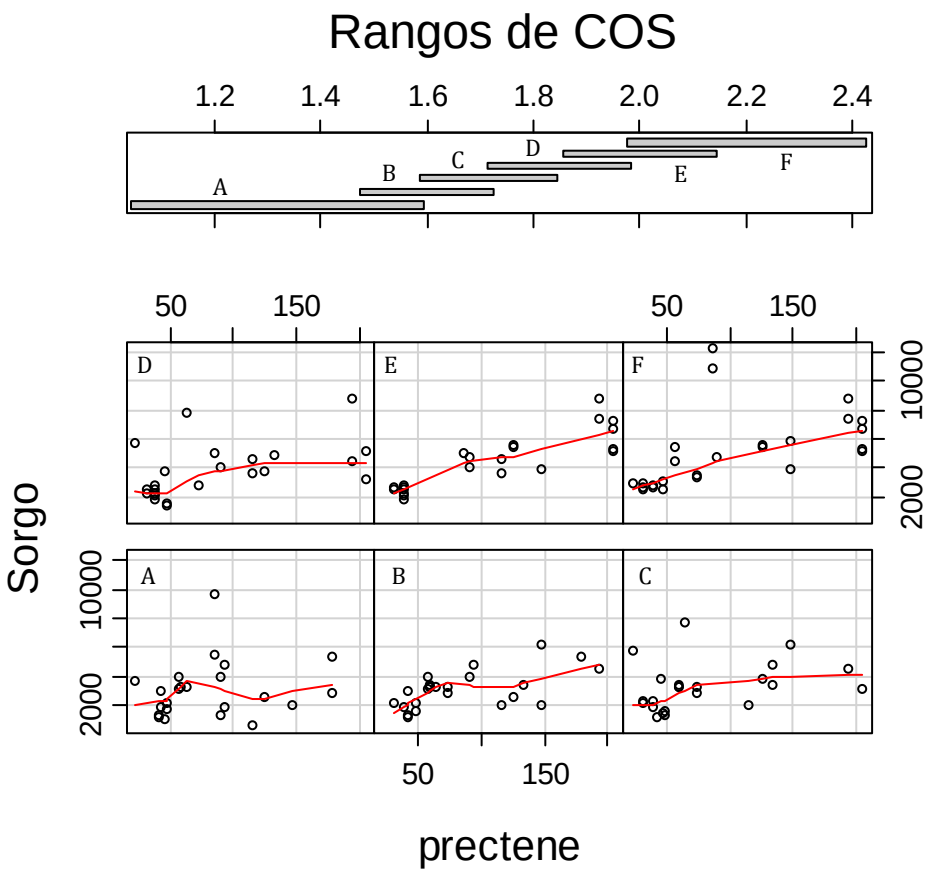

Figura 3. Interacción entre COS y la precipitación de enero en la determinación del rendimiento de sorgo. Se puede observar como el efecto de la precipitación sobre el rendimiento (ilustrada por una regresión local LOESS; Cleveland y Devlin 1988) aumenta en los rangos de mayor COS. Los distintos gráficos corresponden a distintos rangos de COS como lo indican las letras.

Trigo

Las regresiones en los análisis exploratorios para el rendimiento de trigo encontraron una fuerte asociación de este con la variable agrupación de tratamientos (r^2=0.43) pero también con siete variables climáticas locales.

Todas estas variables climáticas explicaron menos del 15 % de la varianza lo que indica que no hay ninguna que por sí sola presente un alto poder de predicción del rendimiento de trigo, sino que sugiere una estructura causal compleja y que se relaciona con varias variables a la vez. Esto se corrobora en el hecho de que excepto el mes de agosto todos los meses del ciclo presentaron alguna variable climática estadísticamente significativa en su regresión con el rendimiento de trigo. Con la fertilización nitrogenada se obtuvo una relación que no se ajustaba a una regresión lineal simple, sino que presentó una

regresión significativa con el percentil 10% inferior del rendimiento. Esto sugeriría que la disponibilidad de nitrógeno por fertilización no sería una limitante por sí sola. Podría estar actuando aquí una interacción con la disponibilidad de agua que permitiría la incorporación y traslocación del nutriente. También podría estar actuando un efecto del contenido de COS en los suelos, donde los suelos con alto COS tendrían suficiente capacidad de proveer nitrógeno al cultivo y por lo tanto no responder tanto a la fertilización y los suelos con bajo COS no. Sin embargo, esto no fue lo encontrado por (Díaz-Rosselló et al. 2009) en este mismo ensayo.

En el modelo completo construido mediante regresiones múltiples para el rendimiento de trigo nuevamente tuvieron términos significativos las variables climáticas de todos los meses excepto agosto. Este modelo incluyó una gran cantidad de variables y excluyó variables que habían resultado claramente significativas en los análisis exploratorios como el año de cosecha y el COS. Esto podría indicar cierto nivel de sobreajuste del modelo, por lo cual sus resultados deben ser interpretados con cautela. Por esta razón se discutirán únicamente las variables climáticas resaltadas por el conjunto de resultados. Adicionalmente, a lo largo de los años en el ensayo la cosecha muestra cierta tendencia a adelantarse por lo que la variable de diciembre pierde importancia ya que hay muchos años en los que en ese mes el cultivo ya se cosechó.

La relación lineal positiva con la precipitación de setiembre y la negativa con la evaporación de setiembre podrían estar sugiriendo la presencia de eventos de baja disponibilidad de agua que afectan el rendimiento en este período. Baethgen (1998b) detectó efectos similares a partir de modelos de simulación pero en etapas posteriores del ciclo (floración). La precipitación y evaporación de noviembre tienen relaciones con pendiente negativa con el rendimiento. Dado que la evaporación está íntimamente relacionada a las temperaturas medias del aire los resultados para este mes podrían ser compatibles con dos mecanismos reportados. Por un lado, el aumento de la humedad y la temperatura podría estar fomentando el desarrollo de las diversas enfermedades bacterianas y fúngicas que afectan fuertemente al trigo (Díaz et al. 1998b; Mazzilli et al. 2007). Por otro lado, períodos de altas temperaturas han sido citadas como causantes de un acortamiento en el período de crecimiento resultando perjudiciales para el rendimiento (Modhej y Banisaeidi 2010). Ambos mecanismos son especialmente

determinantes en las etapas a partir de la floración (Baethgen 1998b; Ferris et al. 1998; Menéndez y Satorre 2007). Estas etapas comienzan con el mes de octubre lo que apoyaría aún más estos posibles mecanismos.

Por último, entre las variables climáticas presentes en el modelo final se encontró el índice del ENOS. Éste presentó una relación lineal negativa con el rendimiento. Los años con índice más positivo corresponden a los que domina la fase "El Niño" de la oscilación que en Uruguay se asocian con mayores precipitaciones en primavera y otoño (Pisciottano et al. 1994; Díaz et al. 1998a). Por lo tanto, este resultado es coherente con la relación de la precipitación de noviembre y el rendimiento. Si bien la relación opuesta y para los cultivos de verano es ampliamente conocida (Baethgen 1998a; Podestá et al. 1999; Roel y Baethgen 2004), la relación encontrada aquí de que la fase cálida del ENOS reduzca los rendimientos de un cultivo de invierno no lo es tanto. Igualmente, algunas relaciones con otros índices basados en anomalías de temperaturas en la superficie del mar ya habían sido reportadas para el trigo en la región (Travasso et al. 2003).

Los resultados para el cultivo no aportan evidencia a favor de la hipótesis 2 ya que no se observaron términos de interacción de las variables climáticas con el COS. Quizás uno de los mecanismos posibles para esta interacción que es a través de la mayor retención de agua en suelos con altos COS no sea importante en el trigo un cultivo que crece en un período caracterizado por la ausencia de ellos. Por otro lado, las características de los análisis realizados en este estudio pueden no haber permitido la detección de evidencias a favor. A futuro sería bueno profundizar sobre esta hipótesis con análisis más específicos y que evalúen los distintos mecanismos posibles.

<u>En general</u>

Todo lo discutido hasta aquí deja en claro la importancia del clima para determinar la productividad de los cultivos de sorgo y trigo en el ensayo y el período de tiempo estudiados. En un escenario con diversidad de factores determinantes del rendimiento el clima fue incorporado a los modelos de regresión múltiple que lo explican. Esto permite aceptar la hipótesis 1 para ambos cultivos y enfatiza la necesidad de incorporar variables climáticas en los estudios que intenten profundizar en la comprensión de la productividad de cultivos.

La variable categórica que reagrupa los tratamientos del ensayo está incluida en el modelo final de ambos cultivos, aumentando el rendimiento de sorgo en los grupos de tratamientos con menor frecuencia de agricultura de grano. Este resultado implica directamente que estos tratamientos proveen a los cultivos de condiciones que favorecen su crecimiento. Sin embargo, los procesos posiblemente implicados son numerosos. En el tratamiento 1, que fue considerado el de referencia en los modelos de ambos cultivos, no existe fertilización y se ha perdido rápidamente una gran proporción del COS (Quincke et al. 2009). En los tratamientos 2 y 6 sí existe fertilización pero también se ha perdido COS a causa de la agricultura continua (Quincke et al. 2009). Estas diferencias podrían llevar a pensar que la información aportada por la variable de agrupación de tratamientos está explicando la varianza generada por la fertilización y el COS por estar correlacionada con ellas. Ciertamente, estas variables están correlacionadas por definición de los tratamientos y es probable que la variable agrupación de tratamientos pueda dar cuenta, aunque sea parcialmente (por ser categórica), de la variación generada por fertilización y COS en el rendimiento. Incluso en el modelo final de trigo la variable agrupación de tratamientos da cuenta mayoritariamente de esta variación que se mostró importante en los análisis exploratorios, al punto que fertilización y COS no son incluidas en el modelo. No obstante, los resultados muestran que la variable de agrupación de tratamientos siempre explicó más varianza que la fertilización o el COS, lo que significa que estaría dando cuenta de varianza generada por diversos procesos bióticos y abióticos adicionales, que varían complejamente asociados con el manejo. El amplio conocimiento que se posee sobre el efecto que las rotaciones de cultivos, la alternancia con pasturas, la frecuencia de laboreo, de cultivos anuales y de uso de herramientas de control químico y otras prácticas de manejo, tienen sobre la erosión del suelo, el ciclado de nutrientes, la diversidad (riqueza, abundancia y composición) de microorganismos del suelo y la superficie (incluyendo patógenos), de herbívoros y sus enemigos naturales, de la diversidad de vegetación espontánea y otras características de la dinámica del ecosistema (Díaz-Rosselló 1992; Abawi y Widmer 2000; Dogliotti et al. 2004; Zerbino et al. 2006; Quincke et al. 2007; Birkhofer et al. 2008; Henderson et al. 2009; Ernst y Siri-Prieto 2009; Ryan et al. 2009; Conde 2011), apoyan esta interpretación.

El ensayo estudiado en este trabajo genera una base de datos compleja, con múltiples fuentes de variación, en algunos casos causalmente relacionadas y en algunos otros correlacionadas, sobre todo entre las variables de suelo y manejo. Adicionalmente el ensayo presenta complejidad debido a la alternancia de especies y tipos de vegetación en la rotación. Esto generó algunas dificultades en los análisis para identificar patrones del efecto climático y en la discusión para interpretar procesos. Sin embargo, esta misma complejidad y variabilidad de la base de datos proveyó de un amplio escenario de condiciones de crecimiento para los cultivos (época tecnológica, rotación, frecuencia de laboreo, COS, fertilización nitrogenada) en los que se pudo evaluar la importancia del efecto del clima. Adicionalmente las variables climáticas aquí en estudio no presentaron correlación con las variables de suelo, año de cosecha y manejo.

Futuros análisis que continúen discerniendo los factores involucrados deberán trabajar con subconjuntos de los datos, agregar datos adicionales o realizar distintos tipos de análisis que sean más informativos para evaluar relaciones concretas. Por ejemplo, sería relevante trabajar únicamente con algunos tratamientos o incluir el efecto parcela mediante modelos mixtos. También se identifica la necesidad de datos de productividad vegetal continua a lo largo del período que puedan ser analizados en forma de series temporales junto con las climáticas, por lo que futuros ensayos deberían considerar la inclusión de un tratamiento continuo de vegetación perenne. Actualmente esta falencia se podría mitigar comparando con datos continuos de productividad primaria como los obtenidos por imaginería satelital y cálculos del Índice Normal de Vegetación (NDVI; Veron et al. 2002; Moriondo et al. 2007; De La Maza et al. 2009) o generando una estandarización entre la productividad de diferentes especies como aquella utilizada por van der Paauw (1962).

Aún con las dificultades de esta base de datos, los modelos construidos demuestran ser capaces de explicar gran parte de la varianza en los rendimientos de sorgo y trigo mediante la utilización de variables de registro de rutina y muchas veces anteriores uno o más meses a la época de cosecha. De continuarse profundizando en este tipo de trabajo se podría seguir generando información útil para la predicción y toma de decisiones en la gestión y conservación de agroecosistemas.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los resultados indican congruentemente la importancia del clima para determinar la productividad de los cultivos de sorgo y trigo en el ensayo y el período de tiempo estudiados. Se han detectado numerosas asociaciones entre variables climáticas locales y el rendimiento de grano.

Las respuestas del rendimiento de cada cultivo a las variables climáticas fueron diversas indicando un efecto general del clima con estructura causal compleja, que podría estar involucrando procesos bióticos, fisiológicos, abióticos y de interacción.

El carbono orgánico del suelo resultó una variable importante en ambos cultivos, resaltando la importancia de la conservación del suelo en agroecosistemas. Incluso, en el caso del sorgo, su efecto sobre el rendimiento interactúa con el clima modulando su efecto. Este potencial es por demás importante en un contexto de adaptación al cambio climático y sería interesante profundizar en la importancia práctica de esta interacción.

El efecto de los tratamientos fue importante en ambos cultivos y explicó más varianza que la fertilización y el COS, principales variables registradas que difieren entre ellos, denotando que hay otros procesos, probablemente biológicos asociados a ellos, los cuales sería interesante investigar.

En el futuro se podrán analizar en más detalle relaciones concretas mediante la utilización de subgrupos de tratamientos o de datos. También se deberá evaluar el efecto de la varianza entre parcelas, idealmente mediante modelos mixtos que no agreguen parámetros a los modelos. Adicionalmente se podría explorar la utilización de otras variables climáticas no utilizadas en este estudio como índices de sequía o balances de agua en el suelo.

Sería interesante poder contrastar los rendimientos de los cultivos en este ensayo con series temporales continuas de productividad primaria (p. ej. NDVI) para poder corroborar el efecto del clima. De esta forma se podrán evaluar impactos del cambio climático sobre la tendencia temporal y discriminarlos de los efectos tecnológicos.

A partir de avances como este en la comprensión del funcionamiento de la productividad de cultivos se podrá abordar preguntas más amplias sobre el funcionamiento de agroecosistemas uruguayos, su productividad primaria, la relación de ésta con la dinámica del carbono en el suelo y la dinámica del resto del ciclo del carbono y otros ciclos biogeoquímicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abawi G. S. y Widmer T. L. 2000. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. Applied Soil Ecology 15(1):37–47.

Abraha T. 1999. Selection methods and genetic variability for traits related to drought resistance in sorghum. Royal Veterinary and Agricultural University Copenhagen, Denmark, Copenhagen, Denmark.

Adam M., Van Bussel L. G. J., Leffelaar P. A., Van Keulen H. y Ewert F. 2011. Effects of modelling detail on simulated potential crop yields under a wide range of climatic conditions. Ecological Modelling 222(1):131–143.

Adams R. M., Hurd B. H., Lenhart S. y Leary N. 1998. Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. Climate Research 11(1):19–30.

Ågren G. I. 2008. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. Annual review of ecology, evolution, and systematics 39:153–170.

Ågren G. I. y Bosatta E. 1998. Theoretical Ecosystem Ecology: Understanding Element Cycles, primera edición. Cambridge University Press.

Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control 19(6):716– 723.

Alexandratos N. 1999. World food and agriculture: Outlook for the medium and longer term. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96(11):5908 –5914.

Alexandrov V. A. y Hoogenboom G. 2000. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. Agricultural and Forest Meteorology 104(4):315–327.

Amundson R. 2001. The carbon budget in soils. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 29(1):535–562.

Amundson R. y Jenny H. 1997. On a State Factor Model of Ecosystems. BioScience 47(8):536–543.

Baethgen W. E. 1998a. El Niño and La Niña Impacts in Southeastern South America. http://www.ccb.ucar.edu/lanina/report/baethgen.html. Acceso el 07/04/2011.

Baethgen W. E. 1998b. Modelos de simulación para diagnóstico de limitaciones. En: Explorando altos rendimientos de trigo, Kohli, M. M. y Martino, D. L. (Eds.). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Centro Internacional de Mejoramiento de Maız y Trigo (CIMMYT), Colonia, Uruguay.

Baier W. 1973. Crop-Weather Analysis Model: Review and Model Development. Journal of Applied Meteorology 12(6):937–947.

Balmukand B. 1928. Studies in Crop Variation: V. The Relation Between Yield and Soil Nutrients. The Journal of Agricultural Science 18(04):602–627.

Bannayan M., Sanjani S., Alizadeh A., Lotfabadi S. S. y Mohamadian A. 2010. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. Field Crops Research 118(2):105–114.

Begg J. E. y Turner N. C. 1976. Crop Water Deficits. En: Advances in Agronomy. Academic Press.

Begon M., Townsend C. R. y Harper J. L. 2006. Ecology: from individuals to ecosystems. Wiley-Blackwell.

Bennett E. M., Carpenter S. R., Peterson G. D., Cumming G. S., Zurek M. y Pingali P. 2003. Why global scenarios need ecology. Frontiers in Ecology and the Environment 1(6):322–329.

Berger A., Díaz M. y Castro M. 2011. Predicción del momento de espigazón: una herramienta para planificar las siembras y diversificar el riesgo de ocurrencia de la fusariosis de la espiga. Revista INIA(25):16–19.

Birkhofer K., Fließbach A., Wise D. H. y Scheu S. 2008. Generalist predators in organically and conventionally managed grass-clover fields: implications for conservation biological control. Annals of Applied Biology 153(2):271–280.

Bleasdale J. K. A. 1966. Plant growth and crop yield: The fourth Barnes Memorial Lecture. Annals of Applied Biology 57(2):173–182.

Brady N. C. y Weil R. R. 2009. Elements of the Nature and Properties of Soils, tercera edición. Prentice Hall.

Brown J. H., Gillooly J. F., Allen A. P., Savage V. M. y West G. B. 2004. Toward a metabolic theory of ecology. Ecology 85(7):1771–1789.

Brye K. R., Gower S. T., Norman J. M. y Bundy L. G. 2002. Carbon Budgets for a Prairie and Agroecosystems: Effects of Land Use and Interannual Variability. Ecological Applications 12(4):962–979.

Buck S. F. 1961. The Use of Rainfall, Temperature, and Actual Transpiration in Some Crop-Weather Investigations. The Journal of Agricultural Science 57(03):355–365.

Cane M. A., Eshel G. y Buckland R. W. 1994. Forecasting Zimbabwean maize yield using eastern equatorial Pacific sea surface temperature. Nature 370(6486):204–205.

Cardinale B. J., Srivastava D. S., Emmett Duffy J., Wright J. P., Downing A. L., Sankaran M. y Jouseau C. 2006. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. Nature 443(7114):989–992.

Carpenter S. R., Stanley E. H. y Vander Zanden M. J. 2011. State of the World's Freshwater Ecosystems: Physical, Chemical, and Biological Changes. Annual Review of Environment and Resources 36(1):75–99.

Cassman K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96(11):5952 –5959.

Cassman K. G., Dobermann A., Walters D. T. y Yang H. S. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annual Review of Environment and Resources 28(1):315–358.

Chapin F. S., Mooney H. A. y Chapin M. C. 2004. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer.

Chapin F. S., Torn M. S. y Tateno M. 1996. Principles of Ecosystem Sustainability. The American Naturalist 148(6):1016–1037.

Chapin F. S., Walker B. H., Hobbs R. J., Hooper D. U., Lawton J. H., Sala O. E. y Tilman D. 1997. Biotic Control over the Functioning of Ecosystems. Science 277(5325):500–504.

Chen B., Black T. A., Coops N. C., Krishnan P., Jassal R., Brümer C. y Nesic Z. 2009. Seasonal controls on interannual variability in carbon dioxide exchange of a near-end-of rotation Douglas-fir stand in the Pacific Northwest, 1997–2006. Global Change Biology 15(8):1962–1981.

Chen C.-C., McCarl B. A. y Schimmelpfennig D. E. 2004. Yield Variability as Influenced by Climate: A Statistical Investigation. Climatic Change 66(1):239–261.

Chmielewski F.-M. y Potts J. M. 1995. The relationship between crop yields from an experiment in southern England and long-term climate variations. Agricultural and Forest Meteorology 73(1–2):43–66.

Churkina G. y Running S. W. 1998. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. Ecosystems 1(2):206–215.

Ciais P., Tans P. P., Trolier M., White J. W. C. y Francey R. J. 1995. A Large Northern Hemisphere Terrestrial CO2 Sink Indicated by the 13C/12C Ratio of Atmospheric CO2. Science 269(5227):1098 –1102.

Clements H. F. 1964. Interaction of Factors Affecting Yield. Annual Review of Plant Physiology 15(1):409–442.

Cleveland W. S. y Devlin S. J. 1988. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. Journal of the American Statistical Association 83(403):596–610.

Conde A. P. 2011. Efecto del glifosato sobre comunidades microbianas benéficas y patógenas del suelo en Uruguay. Tesis de Maestría, PEDECIBA - Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Corsi W. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. CIAAB Miscelánea no. 40.

Decker W. L. 1994. Developments in agricultural meteorology as a guide to its potential for the twenty-first century. Agricultural and Forest Meteorology 69(1–2):9–25.

Díaz A. F., Studzinski C. D. y Mechoso C. R. 1998a. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. Journal of Climate 11(2):251–271.

Díaz M., Kohli M. M., Ceretta S., Abadie T. y Ibañez V. 1998b. Importancia de las enfermedades en la producción del trigo en Uruguay. En: Explorando altos rendimientos de trigo, Kohli, M. M. y Martino, D. L. (Eds.). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), Colonia, Uruguay.

Díaz-Rosselló R. M. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias 1(1):103–110.

Díaz-Rosselló R. M. 2003. 40 años de rotaciones. Introducción a la actividad experimental. En: 40 años de rotaciones agrícolas-ganaderas. INIA.

Díaz-Rosselló R. M., Quincke J. A., Morón A., Sawchik J., Ibañez V. y Balzarini M. 2009. Efecto de la degradación del carbono orgánico del suelo en la productividad potencial de

los cultivos. En: Resúmenes expandidos del Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas. INIA, Montevideo, Uruguay.

Dogliotti S., Rossing W. A. H. y van Ittersum M. K. 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay. Agricultural Systems 80(3):277–302.

Eck H. V. y Musick J. T. 1979. Plant Water Stress Effects on Irrigated Grain Sorghum. I. Effects on Yield. Crop Science 19(5):589–592.

Eden T. y Fisher R. A. 1927. Studies in Crop Variation: IV. The Experimental Determination of the Value of Top Dressings with Cereals. The Journal of Agricultural Science 17(04):548–562.

Engledow F. L. y Wadham S. M. 1923. Investigations on yield in the cereals. I. The Journal of Agricultural Science 13(04):390–439.

Ernst O. y Siri-Prieto G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. Soil and Tillage Research 105(2):260–268.

Evans L. T. 1980. The Natural History of Crop Yield: A combination of improved varieties of crop plants and technological innovations continues to increase productivity, but the highest yields are approaching limits set by biological constraints. American Scientist 68(4):388–397.

Evans L. T. 1998. Feeding the ten billion: plants and population growth. Cambridge University Press.

Fedoroff N. V. y Cohen J. E. 1999. Plants and population: Is there time? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96(11):5903 –5907.

Ferris R., Ellis R. H., Wheeler T. R. y Hadley P. 1998. Effect of High Temperature Stress at Anthesis on Grain Yield and Biomass of Field-Grown Crops of Wheat. Annals of Botany 82(5):631–639.

Field C. B., Chapin F. S., Matson P. A. y Mooney H. A. 1992. Responses of Terrestrial Ecosystems to the Changing Atmosphere: A Resource-Based Approach. Annual Review of Ecology and Systematics 23(1):201–235.

Fisher R. A. 1925. The Influence of Rainfall on the Yield of Wheat at Rothamsted. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character 213:89–142.

Franzluebbers A. J. 2010. Achieving Soil Organic Carbon Sequestration with Conservation Agricultural Systems in the Southeastern United States. Soil Science Society of America Journal 74(2):347.

Freckleton R. P., Watkinson A. R., J. Webb D. y Thomas T. H. 1999. Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients. Agricultural and Forest Meteorology 93(1):39–51.

García-Lamothe A. 1998. Fertilización con N y potencial de rendimiento en trigo. En: Explorando altos rendimientos de trigo, Kohli, M. M. y Martino, D. L. (Eds.). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Centro Internacional de Mejoramiento de Maız y Trigo (CIMMYT), Colonia, Uruguay.

García-Préchac F., Ernst O., Siri-Prieto G. y Terra J. A. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. Soil and Tillage Research 77(1):1–13.

Germán S., Romero R. y Tojo C. 1995. Control de la floración en cebada en Uruguay: respuesta a temperatura y fotoperíodo. En: Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervecera. VI Reunión Nacional de investigadores en cebada. Montevideo, Uruguay.

Giménez L. y García Petillo M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia (Montevideo) 15(2):100–108.

Ginzburg L. R. y Jensen C. X. J. 2004. Rules of thumb for judging ecological theories. Trends in Ecology & Evolution 19(3):121–126.

Gregory F. G. 1926. The Effect of Climatic Conditions on the Growth of Barley. Annals of Botany os-40(1):1–26.

van der Heijden M. G. ., Klironomos J. N., Ursic M., Moutoglis P., Streitwolf-Engel R., Boller T., Wiemken A. y Sanders I. R. 1988. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. Geol. Soc. Am. Bull 100:912–927.

Henderson I. G., Ravenscroft N., Smith G. y Holloway S. 2009. Effects of crop diversification and low pesticide inputs on bird populations on arable land. Agriculture, Ecosystems & Environment 129(1-3):149–156.

Holmgren M., Stapp P., Dickman C. R., Gracia C., Graham S., Gutiérrez J. R., Hice C., Jaksic F., Kelt D. A., Letnic M., Lima M., López B. C., Meserve P. L., Milstead W. B., Polis G. A., Previtali M. A., Richter M., Sabaté S. y Squeo F. A. 2006. Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. Frontiers in Ecology and the Environment 4(2):87–95.

Houghton R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. Tellus B 55(2):378–390.

Howell T. A., Phene C. J., Meek D. W. y Miller R. J. 1983. Evaporation from screened class A pans in a semi-arid climate. Agricultural Meteorology 29(2):111–124.

Hsiao T. C. 1973. Plant Responses to Water Stress. Annual Review of Plant Physiology 24(1):519–570.

Huda A. K. S., Ghildyal B. P. y Tomar V. S. 1976. Contribution of climatic variables in predicting maize yield under monsoon conditions. Agricultural Meteorology 17(1):33–47.

INIA. 2010. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Banco de datos agroclimático. http://www.inia.org.uy/online/site/692646I1.php. Acceso el 22/07/2010.

Jenny H. 1941. Factors of Soil Formation, 1ª edición. McGraw-Hill Book Company Inc., New York.

De Jong R., Campbell C. A. y Nicholaichuk W. 1983. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. Canadian Journal of Soil Science 63(2):291–302.

Jordan W. R. y Miller F. R. 1980. Genetic variability in sorghum root systems: implications for drought tolerance. En: Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress, Turner, N. C. y Kramer, P. J. (Eds.). Wiley-Interscience, New York.

Keeling C. D., Chin J. F. S. y Whorf T. P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO2 measurements. Nature 382(6587):146–149.

Kohli M. M. y Martino D. L. 1998. Explorando altos rendimientos de trigo. CIMMYT.

Krave A. S., van Straalen N. M., van Verseveld H. W. y Röling W. F. M. 2007. Influence of the El Nino and La Nina climate events and litter removal on inorganic nitrogen dynamics in pine forest soils on Central Java, Indonesia. European Journal of Soil Biology 43(1):39–47.

Kulmatiski A., Beard K. H., Stevens J. R. y Cobbold S. M. 2008. Plant-soil feedbacks: a meta-analytical review. Ecology Letters 11(9):980–992.

De La Maza M., Lima M., Meserve P. L., GutiéRrez J. R. y Jaksic F. M. 2009. Primary production dynamics and climate variability: ecological consequences in semiarid Chile. Global Change Biology 15(5):1116–1126.

Lal R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. Science 304(5677):1623 –1627.

Lawn R. J., Summerfield R. J., Ellis R. H., Qi A., Roberts E. H., Chay P. M., Brouwer J. B., Rose J. L. y Yeates S. J. 1995. Towards the Reliable Prediction of Time to Flowering in Six Annual Crops. VI. Applications in Crop Improvement. Experimental Agriculture 31(01):89–108.

Lensing J. R. y Wise D. H. 2006. Predicted climate change alters the indirect effect of predators on an ecosystem process. Proceedings of the National Academy of Sciences 103(42):15502.

Lewis R. B., Hiler E. A. y Jordan W. R. 1974. Susceptibility of Grain Sorghum to Water Deficit at Three Growth Stages. Agronomy Journal 66(4):589–591.

Lima M. 2007. Locust plagues, climate variation, and the rhythms of nature. Proceedings of the National Academy of Sciences 104(41):15972 –15973.

Lima M., Stenseth N. C. y Jaksic F. M. 2002. Food web structure and climate effects on the dynamics of small mammals and owls in semi-arid Chile. Ecology Letters 5(2):273–284.

Lindeman R. L. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology 23:399–418.

Lobell D. B. y Asner G. P. 2003. Climate and Management Contributions to Recent Trends in U.S. Agricultural Yields. Science 299(5609):1032.

Lobell D. B., Cahill K. N. y Field C. B. 2007. Historical effects of temperature and precipitation on California crop yields. Climatic Change 81(2):187–203.

Loomis R. S. y Connor D. J. 1992. Crop ecology: productivity and management in agricultural systems, 1ª edición. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Magdoff F., Es H. V. y Network S. A. 2000. Building soils for better crops. Sustainable Agriculture Network.

Magdoff F. y Weil R. R. 2004. Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press.

Mann L. K. 1986. Changes in Soil Carbon Storage After Cultivation. Soil Science 142(5):279–288.

Mantel S., Engelen V. W. ., Molfino J. H. y Resink J. W. 2000. Exploring biophysical potential and sustainability of wheat cultivation in Uruguay at the national level. Soil Use and Management 16(4):270–278.

Martínez N. D. 1995. Unifying ecological subdisciplines with ecosystem food webs. En: Linking species and ecosystems, Jones, C. G. y Lawton, J. H. (Eds.). Chapman & Hall, New York.

Matson P. A., Parton W. J., Power A. G. y Swift M. J. 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. Science 277(5325):504–509.

Mazzilli S., Pérez C. y Ernst O. 2007. Fusariosis de la espiga en trigo: características de la enfermedad y posibilidades de uso de modelos de predicción para optimizar el control químico. Agrociencia 11(1):11–21.

Meir P., Cox P. y Grace J. 2006. The influence of terrestrial ecosystems on climate. Trends in Ecology & Evolution 21(5):254–260.

Menéndez F. J. y Satorre E. H. 2007. Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. Agricultural Systems 95(1–3):1–10.

Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Modhej A. y Banisaeidi A. K. 2010. Effect of post-anthesis heat stress on grain yield of barley, durum and bread wheat genotypes. En: Proceedings of the 10th International Barley Genetics Symposium. ICARDA, Alejandría, Egipto.

Mooney H. A. 1972. The Carbon Balance of Plants. Annual Review of Ecology and Systematics 3(1):315–346.

Morgan J. M. 1984. Osmoregulation and Water Stress in Higher Plants. Annual Review of Plant Physiology 35(1):299–319.

Moriondo M., Maselli F. y Bindi M. 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. European Journal of Agronomy 26(3):266–274.

Myneni R. B., Los S. O. y Tucker C. J. 1996. Satellite-based identification of linked vegetation index and sea surface temperature anomaly areas from 1982–1990 for Africa, Australia and South America. Geophysical Research Letters 23(7):729–732.

Neter J., Kutner M. H., Nachtsheim C. J. y Wasserman W. 1996. Applied linear statistical models. McGraw-Hill.

Nix H. 1976. Climate and crop productivity in Australia. En: Proceedings of the Symposium on Climate & Rice. Los Baños, Filipinas, IRRI.

NOAA. 2010. National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series. http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/. Acceso el 26/07/2010.

van der Paauw F. 1962. Periodic fluctuations of soil fertility, crop yields and of responses to fertilization effected by alternating periods of low or high rainfall. Plant and Soil 17(2):155–182.

Peacock J. M. 1975. Temperature and Leaf Growth in Lolium perenne. I. The Thermal Microclimate: Its Measurement and Relation to Crop Growth. Journal of Applied Ecology 12(1):99–114.

Penman H. L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 193(1032):120–145.

Pisciottano G., Díaz A., Cazess G. y Mechoso C. R. 1994. El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay. Journal of Climate 7:1286–1304.

Podestá G. P., Letson D., Messina C., Royce F., Ferreyra R. A., Jones J., Hansen J., Llovet I., Grondona M. y O'Brien J. J. 2002. Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: a pilot experience. Agricultural Systems 74(3):371–392.

Podestá G. P., Messina C. D., Grondona M. O. y Magrin G. O. 1999. Associations between Grain Crop Yields in Central-Eastern Argentina and El Niño–Southern Oscillation. Journal of Applied Meteorology 38(10):1488–1498.

Qi Y. 2002. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises. Ecological Modelling 153(1-2):131–142.

Quincke J. A., Franti T., Wortmann C. S., Drijber R. A. y Mamo M. 2007. Occasional Tillage of No-Till Systems. Agronomy Journal 99(4):1158–1168.

Quincke J. A., Morón A., Sawchik J., García-Lamothe A. y Díaz-Rosello R. M. 2009. Dinámica del C orgánico en sistemas agrícolas de Uruguay. En: Resúmenes expandidos del Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas. Montevideo.

R Development Core Team. 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. http://www.R-project.org.

Riha S. J., Wilks D. S. y Simoens P. 1996. Impact of temperature and precipitation variability on crop model predictions. Climatic Change 32(3):293–311.

Ritchie J. T., Godwin D. C. y Otter-Nacke S. 1988. CERES-Wheat. A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, Texas, EE. UU.

Roel A. y Baethgen W. E. 2004. Asociaciones entre las fases de El Niño y la producción arrocera del Uruguay. INIA.

Romero R. 2002. Relaciones Agua-Planta en el sistema suelo-planta-atmósfera. http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/informe-13.pdf. Acceso el 04/02/2012.

Rosenzweig C. y Parry M. L. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. Nature 367(6459):133–138.

Rosenzweig M. L. 1968. Net Primary Productivity of Terrestrial Communities: Prediction from Climatological Data. The American Naturalist 102(923):67–74.

Rosenzweig M. L. y Abramsky Z. 1993. How are diversity and productivity related? En: Species diversity in Ecological Communities, Ricklefs, R. E. y Schluter, D. (Eds.). Univ of Chicago, Chicago and London.

Ryan M. R., Smith R. G., Mortensen D. A., Teasdale J. R., Curran W. S., Seidel R. y Shumway D. L. 2009. Weed–crop competition relationships differ between organic and conventional cropping systems. Weed Research 49(6):572–580.

Salisbury F. B. y Ross C. W. 1992. Plant physiology. Wadsworth Pub. Co.

Salter P. J. y Goode J. E. 1967. Crop responses to water at different stages of growth. http://www.cabdirect.org/abstracts/19670702077.html. Acceso el 04/04/2012.

Salvo L., Hernández J. y Ernst O. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. Soil and Tillage Research 109(2):116–122.

Schlenker W. y Roberts M. J. 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 106(37):15594 –15598.

Schlesinger W. H., Belnap J. y Marion G. 2009. On carbon sequestration in desert ecosystems. Global Change Biology 15(6):1488–1490.

Schwarz G. 1978. Estimating the Dimension of a Model. The Annals of Statistics 6(2):461–464.

Sentelhas P. C. y Folegatti M. V. 2003. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ETo). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 7(1):111–115.

Shawcroft R. W., Lemon E. R., Allen Jr. L. H., Stewart D. W. y Jensen S. E. 1974. The soil--plant--atmosphere model and some of its predictions. Agricultural Meteorology 14(1-2):287–307.

Sheather S. 2009. A Modern Approach to Regression with R. Springer, New York.

Shipley B. 2000. Cause and correlation in Biology: A user's guide to path analysis, structural equations and causal inference. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Six J., Elliott E. T. y Paustian K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. Soil Science Society of America Journal 63(5):1350.

Six J. y Jastrow J. D. 2002. Organic matter turnover. Encyclopedia of soil science:936–942.

Stenseth N. C., Mysterud A., Ottersen G., Hurrell J. W., Chan K. S. y Lima M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. Science 297(5585):1292.

Stige L. C., Stave J., Chan K. S., Ciannelli L., Pettorelli N., Glantz M., Herren H. R. y Stenseth N. C. 2006. The effect of climate variation on agro-pastoral production in Africa. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103(9):3049.

Teng P. S., Blackie M. J. y Close R. C. 1977. A simulation analysis of crop yield loss due to rust disease. Agricultural Systems 2(3):189–198.

Terra J. A. y García-Préchac F. 2001. Efecto de la intensidad de uso y laboreo sobre el recurso suelo y su calidad. En: Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: Síntesis 1995-2000. INIA.

Tilman D. 1997. The Influence of Functional Diversity and Composition on Ecosystem Processes. Science 277(5330):1300–1302.

Tilman D. 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96(11):5995 –6000.

Tilman D., Cassman K. G., Matson P. A., Naylor R. y Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418(6898):671.

Tilman D., Reich P. B., Knops J., Wedin D., Mielke T. y Lehman C. 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. Science 294(5543):843–845.

Tinsley J. 1950. The determination of organic carbon in soils by dichromate mixtures. Transactions 4th Int. Cong. Soil Sci. 1:161–164.

Travasso M. I., Magrin G. O. y Rodríguez G. R. 2003. Relations between sea-surface temperature and crop yields in Argentina. International Journal of Climatology 23(13):1655–1662.

Turner N. C. 1986. Crop Water Deficits: A Decade of Progress. En: Advances in Agronomy. Academic Press.

Turner N. C., Schulze E.-D. y Gollan T. 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. Oecologia 65(3):348–355.

Underwood A. J. 1997. Experiments in ecology: their logical design and interpretation using analysis of variance. Cambridge University Press.

Veron S. R., Paruelo J. M., Sala O. E. y Lauenroth W. K. 2002. Environmental Controls of Primary Production in Agricultural Systems of the Argentine Pampas. Ecosystems 5(7):625–635.

Vitousek P. M., Mooney H. A., Lubchenco J. y Melillo J. M. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. Science 277(5325):494–499.

Waide R., Willig M. R., Steiner C., Mittelbach G., Gough L., Dodson S., Juday G. y Parmenter R. 1999. The relationship between productivity and species richness. Annual Review of Ecology and Systematics:257–300.

Weltzin J. F., Loik M. E., Schwinning S., Williams D. G., Fay P. A., Haddad B. M., Harte J., Huxman T. E., Knapp A. K., Lin G. y others. 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. Bioscience 53(10):941–952.

Went F. W. 1953. The Effect of Temperature on Plant Growth. Annual Review of Plant Physiology 4(1):347–362.

Wootton J. T. 1998. Effects of Disturbance on Species Diversity: A Multitrophic Perspective. The American Naturalist 152(6):803–825.

Yang Y. 2005. Can the strengths of AIC and BIC be shared? A conflict between model indentification and regression estimation. Biometrika 92(4):937–950.

Zerbino M. S., Rodríguez C. y Altier N. 2006. Earthworms in Agro-ecosystems of Uruguay. Caribbean Journal of Science 42(3):315.

Zhao M. y Running S. W. 2010. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. Science 329(5994):940–943.