

# **Dominios de extrapolación de tecnologías para acelerar innovaciones agrícolas**

*Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*

**Juan Ignacio Rattalino Edreira**

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de La Pampa - 2007  
Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires - 2013

Lugar de trabajo: University of Nebraska-Lincoln, USA



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires



## **TUTOR/ES**

Tutor

**Patricio Grassini**

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires

PhD – University of Nebraska-Lincoln

## **JURADO DE TRABAJO FINAL**

Jurado

**Dr. Pablo Baldassini**

Licenciado en Ciencias Ambientales - Universidad de Buenos Aires  
Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

Jurado

**Dr. Santiago Ramón Verón**

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires  
Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del Trabajo Final: 13 de Diciembre de 2019

**DEDICATORIA**

*a Ago y Antonia  
a mis padres  
a mis hermanos  
a mi abuelo*

*nada hubiera sido posible sin el apoyo de ustedes*

**DECLARACIÓN**

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución”.

Dr. Ing. Agr. Juan Ignacio Rattalino Edreira

## CONTRIBUCIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO DE GRADUACION

### Trabajos científicos publicados en revistas internacionales con referato

**Rattalino Edreira, J.I.**, Cassman, K.G., Hochman, Z., van Ittersum, M.K., van Bussel, L.G.J., Claessens, L., Grassini, P., 2018. Beyond the plot: Technology extrapolation domains for scaling out agronomic science. *Environmental Research Letters* 13, 054027.

### Contribuciones en Congresos y Reuniones científicas

**Rattalino Edreira, J.I.** (Presentador), Cassman, K.G., Hochman, Z., Van Ittersum, M.K., Van Bussel, L.G.J., Claessens, L., Grassini, P., 2018. Beyond the plot: Technology extrapolation domains for scaling out agronomic science. The Bertebos Conference 2018. Global Food Security – Ensuring sustainable food production at local to global scales. Falkenberg, Sweden.

**Rattalino Edreira, J.I.** (Presentador), 2017. Technology Extrapolation Domain. CCAFS Crop Nutrient Gaps International Workshop. Kisumu, Kenya

Grassini P., **Rattalino Edreira J.I.** (Autor), Cassman K.G., de Groot H., Chapman K., McGuire J., Ecker, G., 2017. Going Beyond the Plot: Developing a Tool for Technology Extrapolation in Agriculture. ASA, CSSA, and SSSA Annual Meeting – Tampa, FL.

**Rattalino Edreira, J.I.** (Presentador), Cassman, K.G., Van Ittersum, M.K., Hochman, Z., Van Bussel, L.G.J., Claessens, L., Grassini, P., 2016. Going beyond the plot: Accelerating innovation in agriculture. ASA, CSSA, SSSA annual meeting – Phoenix, AR.

### Herramientas on-line

**Rattalino Edreira J.I.** (co-desarrollador), 2018. TED Framework Tool (<http://nutrientstar.org/ted-framework/>). NutrientStar program, Environmental Defense Fund, New York, USA.

### Patentes

Grassini P., Cassman K.G., van Ittersum M.K., **Rattalino Edreira J.I.** (Inventor), van Wart, J., Technology Extrapolation Domains spatial framework ([www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)), University of Nebraska-Lincoln.

**INDICE DE CONTENIDOS**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
2.1. Desarrollo del marco espacial de extrapolación de tecnología .....	3
2.2. Validación del MET.....	5
2.3. Caso de estudio para demostrar la aplicabilidad del MET.....	7
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>8</b>
3.1. Descripción del MET .....	8
3.2. Validación del MET.....	10
3.1. Dominios de extrapolación tecnológica como herramienta para mejora la evaluación de tecnologías a campo.....	15
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>17</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>18</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>19</b>

## **Resumen**

Asegurar una adecuada provisión de alimentos en sistemas agrícolas que procuran conservar la calidad del medioambiente requiere que los sistemas de cultivos actuales sean más productivos y eficientes. Alcanzar este desafío será difícil sin un marco espacial robusto que facilite la evaluación y extrapolación de tecnologías agrícolas actuales y futuras. En este proyecto se desarrolló un marco espacial global que delinea “dominios de extrapolación de tecnologías” basado en variables biofísicas (climáticas y edáficas) relevantes para el rendimiento de cultivos en sistemas de producción de secano. El marco espacial fue evaluado satisfactoriamente por su habilidad para representar patrones espaciales y temporales de rendimiento en maíz y soja del Cinturón maicero de Estados Unidos, región que representa un tercio de la producción mundial de estos cultivos. A modo de exhibir posibles aplicaciones del marco espacial, el mismo fue utilizado para optimizar la localización de una red de experimentos real con el fin alcanzar la mayor representatividad del área total de cultivo para un número de experimentos dado. Este caso de estudio demostró la utilidad del marco espacial para mejorar la eficiencia de los programas de investigación agrícola que buscan intensificar la producción en las tierras de cultivo existentes y evaluar el impacto de dichos programas.

**Abreviaturas**

CRH: capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular.

CV: coeficiente de variación

DET: dominio de extrapolación de tecnologías.

MET: marco espacial de extrapolación de tecnologías

## 1. Introducción

Agronomía es la ciencia del manejo de cultivos y suelos para producir alimento, fibra, y forrajes de manera sustentable para que los recursos naturales puedan ser utilizados por generaciones actuales y futuras. Es una disciplina aplicada que depende en gran medida de experimentos a campo para identificar tecnologías agrícolas apropiadas para un determinado ambiente productivo, evaluar las interacciones entre dichas tecnologías, y comprender sus efectos a largo plazo sobre las propiedades edáficas que influyen la productividad de los cultivos y el medioambiente. En este escrito se define tecnologías agrícolas en su sentido más amplio, el cual incluye prácticas como fecha de siembra, labranza, control de malezas y plagas, aplicación de fertilizantes, variedades, etc., al igual que innovaciones a nivel de sistema tal como nuevas rotaciones de cultivo, intercultivos, y cultivos de cobertura.

Cada año sectores agrícolas públicos y privados en todo el mundo invierten billones de dólares en investigación y desarrollo (Pardey et al., 2016). Gran parte de esta inversión es destinada a realizar experimentos a campo para identificar tecnologías adecuadas para incrementar el rendimiento de los cultivos, reducir riesgos productivos, aumentar la rentabilidad, y preservar el medioambiente. Sin embargo, la extrapolación de los hallazgos derivados de estos experimentos se encuentra limitada por la falta de un marco espacial de extrapolación de tecnologías (MET) que permita identificar áreas de cultivo con similares características edáficas y climáticas donde sería esperable una respuesta similar a la tecnología evaluada. Del mismo modo, la capacidad de utilizar esos resultados para priorizar inversiones y evaluar el impacto de dichas inversiones se encuentra limitada por la falta de un método para extrapolar resultados locales a nivel regional, nacional, y global (Grassini et al., 2017). En otras palabras, la investigación agrícola basada en experimentos a campo se funda en gran medida en “prueba y error”, lo cual ralentiza el progreso hacia la adopción de tecnologías apropiadas para cada sistema de cultivo, al mismo tiempo que restringe la inversión efectiva de fondos destinados a investigación y desarrollo agrícola.

El desarrollo de un MET robusto, capaz de delinear regiones en las que tecnologías agrícolas respondan similarmente, contribuiría a superar las restricciones descritas anteriormente. En principio, el impacto de una tecnología dada, y su probabilidad de adopción por parte de productores, debería ser predecible dentro de una región espacialmente definida con similares atributos biofísicos (principalmente propiedades climáticas y edáficas) y socio-económicos (*e.g.*, precio de insumos y productos, tamaño de la explotación agrícola, acceso al crédito y los mercados). Cada combinación de variables biofísicas y socio-económicas es definida como “dominio de extrapolación de tecnologías” (DET). Como un primer paso hacia el desarrollo de un MET, en este estudio se focalizó en los atributos biofísicos que definen los DET para cultivos de secano, reconociendo la necesidad de contar con atributos socio-económicos, especialmente en regiones donde los productores presentan grandes limitaciones al acceso de insumos, maquinarias, crédito, mercados y conocimientos (*e.g.*, Africa sub-Sahariana).

A pesar de ser conceptualmente robusto, el desarrollo de un MET robusto ha sido dificultoso debido a tres razones principales. Primero, la falta de información climática y edáfica con suficiente resolución y cobertura espacial para variables con gran influencia en el crecimiento de cultivos y, por ende, la respuesta a tecnologías

agrícolas. Entre estas variables se destacan los regímenes de precipitación y temperatura, al igual que la capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular (CRH; Lawes et al., 2009; Williams et al., 2016). Avances recientes en el manejo y acceso a bases de datos públicas de clima y suelo han permitido superar estas limitantes en ciertas regiones del mundo (van Wart et al., 2013; Soil Survey Staff, 2016; Leenaars et al., 2018).

La segunda dificultad es encontrar un equilibrio efectivo entre delinear DET demasiado amplios de tal manera que la variabilidad climática y edáfica dentro de los dominios sea excesiva (haciendo que la respuesta del cultivo a una tecnología dada varié mucho dentro del dominio), y demasiado refinados como para que los beneficios de la agregación desaparezcan. En este sentido, tal como indica van Wart et al. (2013), esfuerzos anteriores han resultado en MET demasiado groseros o refinados para ser utilizados en investigación y desarrollo agrícola. La primera categoría incluye MET desarrollados a escala global pero basados en datos climáticos y edáficos de escasa resolución espacial que resultan agrónomicamente irrelevantes (e.g., FAO, 1978; Wood and Pardey, 1998; Fischer et al., 2002; Padbury et al., 2002; Soil Survey Staff et al., 2006). La segunda categoría está compuesta por MET desarrollados para regiones y cultivos específicos, típicamente basados en un gran número de atributos biofísicos o datos de rendimiento a nivel de lote cuya relevancia es restringida a la región de estudio (e.g., Singh et al., 1999; Kouadio and Newlands, 2015; Danvi et al., 2016). Por lo tanto, su aplicabilidad se encuentra limitada por la falta de representación a escalas regionales amplias (e.g., continente, global) y su alta demanda de información, generalmente no disponible para muchas regiones y cultivos.

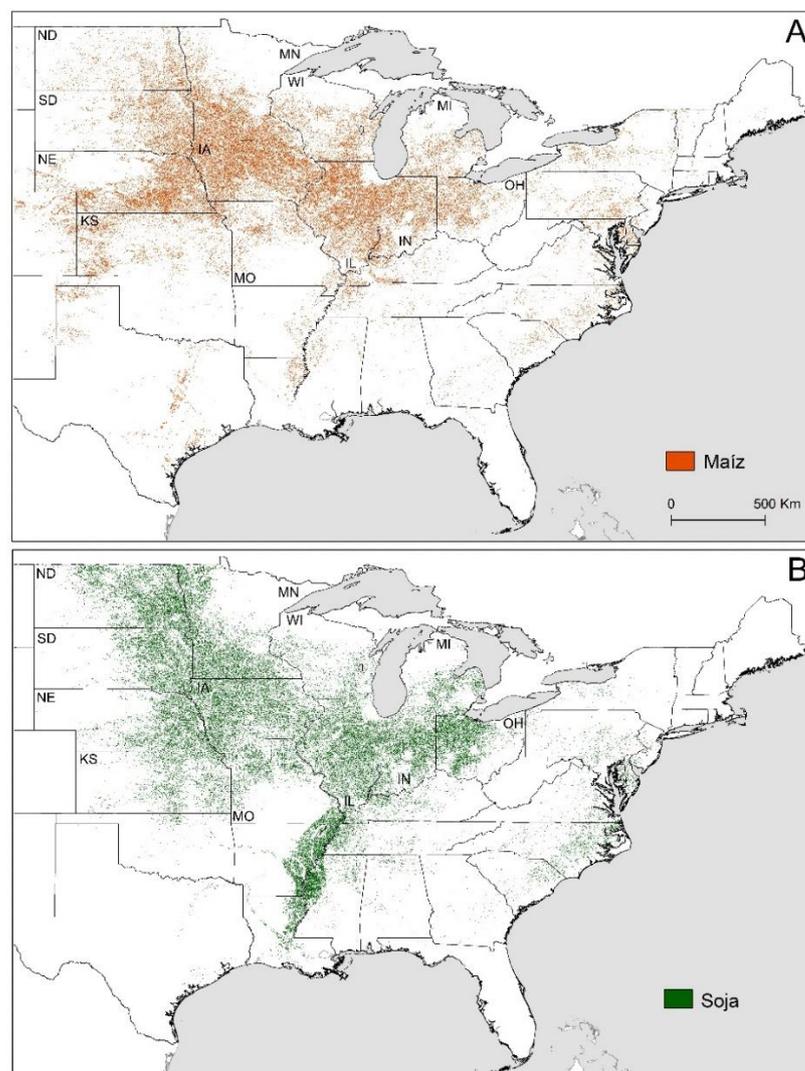
La tercera dificultad, y tal vez la más importante, es la necesidad de validar el MET en su habilidad para predecir el rendimiento de los cultivos. Si bien estudios previos evaluaron la capacidad de ciertas aproximaciones basadas en simulaciones de cultivos y modelos estadísticos para extrapolar rendimientos de cultivos desde la escala local a la regional (e.g., Kouadio and Newlands, 2015; van Bussel et al., 2015; Hochman et al., 2016), estos estudios fueron realizados en regiones geográficas pequeñas y consistieron en enfoques que requieren una gran cantidad de datos. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar y evaluar un MET genérico, relevante a nivel local y global, que pueda utilizarse para priorizar la investigación y desarrollo agrícola y así, permitir la intensificación sustentable de sistemas de cultivos a lo largo de distintas escalas espaciales.

Los objetivos de este estudio fueron (i) desarrollar un MET para facilitar la transferencia de tecnologías agrícolas actuales y futuras, (ii) realizar una validación cuantitativa del MET basada en su habilidad para representar variaciones espaciales y temporales de rendimiento en sistemas de cultivo de secano, y (iii) mostrar una aplicación potencial del MET. A pesar que el MET podría ser aplicado a escala global, la evaluación del mismo requiere datos climáticos, edáficos y de rendimiento de cultivo con alta resolución espacial y temporal que sólo están públicamente disponibles en ciertas regiones. Por lo tanto, este proyecto se centró en sistemas de cultivo del cinturón maicero de Estados Unidos, los cuales tienen una gran relevancia para la producción de alimento global y poseen datos abundantes y certeros de clima, suelo, y cultivo.

## 2. Materiales y métodos

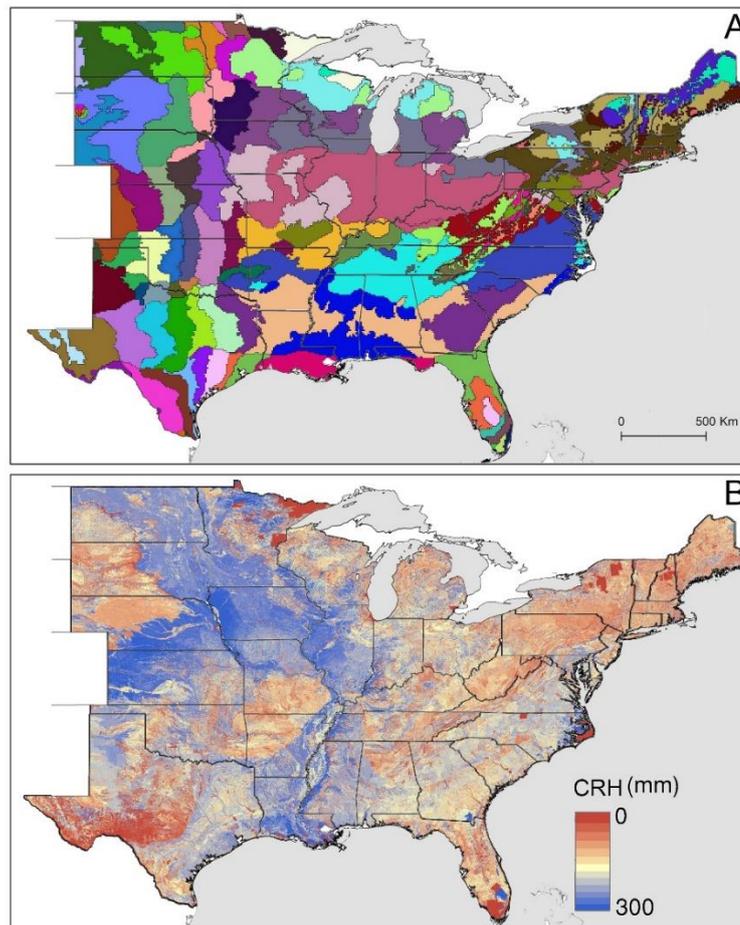
### 2.1. Desarrollo del marco espacial de extrapolación de tecnología

El cinturón maicero de Estados Unidos proporciona un caso de estudio excepcional para desarrollar y validar el MET dado que representa el 34% de la producción mundial de maíz y soja (período 2012-2016; USDA-NASS, 2018a; FAOSTAT, 2019), e incluye una considerable variación climática y edáfica (Grassini et al., 2015). Por ejemplo, la precipitación anual varía de 350 mm al oeste región a 1300 mm al este, mientras que la temperatura del aire media anual es de 6.2°C en el norte de la región y 14°C en el sur. La Figura 1 muestra la distribución de maíz y soja en el cinturón maicero de Estados Unidos, el cual se localiza principalmente en 10 estados: North Dakota (ND), South Dakota (SD), Nebraska (NE), Kansas (KS), Minnesota (MN), Iowa (IA), Missouri (MO), Wisconsin (WI), Illinois (IL), Indiana (IN), Michigan (MI), y Ohio (OH).



**Figura 1:** Distribución del cultivo de maíz y soja en la región Central-Norte de Estados Unidos durante la campaña 2015 (USDA-NASS, 2018b).

El marco espacial de extrapolación de tecnología se desarrolló a partir de la combinación del marco espacial de “zonas climáticas” (van Wart et al., 2013) desarrollado por el “Atlas de brechas de rendimiento global” (GYGA por sus siglas en inglés, [www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)) y el mapa de CRH del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 2016) (Figura 2). La CRH es una medida de la cantidad de agua que el suelo puede almacenar y poner a disposición del cultivo durante períodos sin precipitaciones. Por ejemplo, un suelo típico del Cinturón maicero de Estados Unidos puede almacenar 250 mm de agua disponible para el cultivo en la zona radicular de maíz, que es suficiente para mantener el crecimiento del cultivo sin estrés hídrico severo durante periodos sin lluvia de aproximadamente 3 semanas durante el período pico de demanda hídrica (julio y agosto). Otras propiedades del suelo como el pH y la disponibilidad de nutrientes también pueden afectar el rendimiento del cultivo y la respuesta del mismo a ciertas tecnologías, pero dado que estos atributos pueden ser modificados a corto plazo por el manejo del suelo, no fueron incluidos como variables categóricas en el MET.



**Figura 2:** Mapa de (A) zonas climáticas y (B) capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular (CRH) para la región Central-Norte de Estados Unidos.

El esquema de la zona climática desarrollado por van Wart et al. (2013) cubre toda la superficie terrestre. Cada zona climática es una combinación de (i) grados-días de crecimiento anual, (ii) índice de aridez, y (iii) estacionalidad de la temperatura del aire. Los grados-días de crecimiento anual se calcularon siguiendo Licker et al. (2010) como la suma de temperatura promedio mensual para el periodo 1950-2000 con una temperatura base de cultivo no específica (0 °C). El índice de aridez se estimó como el

cociente entre la precipitación y la evapotranspiración promedio anual para el periodo 1950-2000. La estacionalidad de la temperatura del aire se calculó como la desviación estándar de las temperaturas medias mensuales. Tanto los grados-días de crecimiento como la estacionalidad de la temperatura se calcularon utilizando datos climáticos del período 1950-2000 de WorldClim (Hijmans et al., 2005) y el índice de aridez se obtuvo del Consorcio para la Información Espacial perteneciente al Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR-CSI por sus siglas en inglés; Zomer et al., 2008). Los rangos de cada una de estas variables, excluyendo aquellas áreas terrestres donde el área de cultivo ocupa <0.5% del área total, fueron divididas en 10 intervalos de clases para los grados-días de crecimiento y el índice de aridez, y en 3 intervalos de clases para la estacionalidad de temperatura. Dichas clases se combinaron en una matriz de 300 zonas climáticas posibles. En relación con otros esquemas agroclimáticos, el esquema de la zona climática GYGA logró el mejor compromiso entre el número de zonas climáticas y la variabilidad climática dentro de cada zona climática (van Wart et al., 2013; van Bussel et al., 2015). El mapa de zonas climáticas se encuentra disponible en la página web del “Atlas de brechas de rendimiento global” (<http://www.yieldgap.org/web/guest/cz-ted>).

Porciones aisladas muy pequeñas de zonas climáticas (“inclusiones”), probablemente consecuencia de artefactos en los datos subyacentes o métodos para construir las zonas climáticas, fueron eliminadas del esquema original de zona climáticas. Para eliminar dichas inclusiones, se debieron cumplir los siguientes requisitos (i) inclusión menor a 350 kha, (ii) zona climática circundante a la inclusión al menos cinco veces mayor al área de la inclusión, y (iii) baja fluctuación de la elevación del terreno de la inclusión (desvió estándar promedio menor a 10%). Este procedimiento tuvo como finalidad descartar inclusiones atribuibles a artefactos en el cálculo de zonas climáticas, y al mismo tiempo preservar microclimas reales generados por cambios repentinos en la temperatura y la precipitación debido a la elevación del terreno o proximidad a cuerpos de agua. El mapa de elevación del terreno se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación creado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-FSA-APFO, 2016).

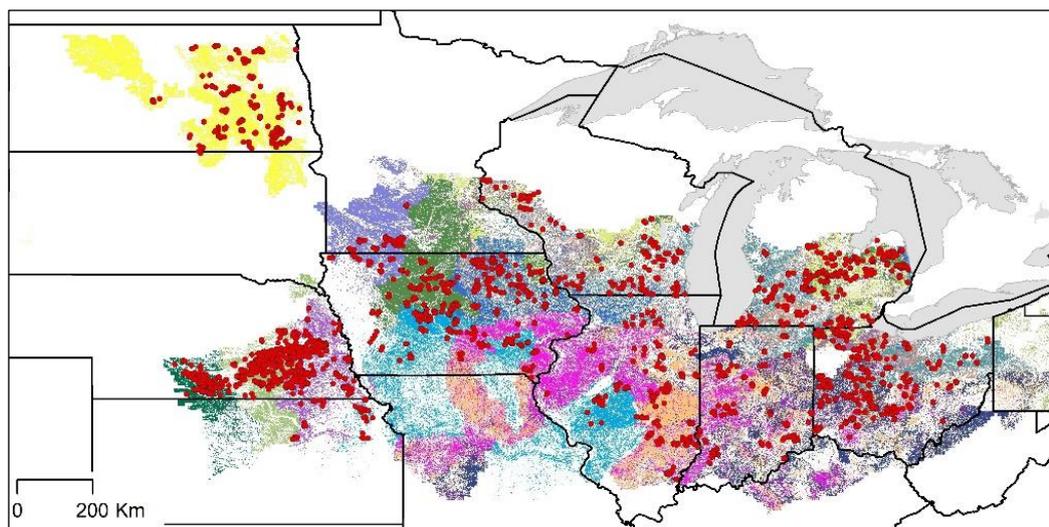
El MET se creó al interceptar el mapa de zonas climáticas refinadas (resolución de pixel de 10 x 10 km) con el mapa de CRH (resolución de pixel de 30 m), cuyos valores fueron previamente agrupados en 7 clases con intervalos de clase de 50 mm de CRH. Todas las capas de información de remuestrearon para obtener una resolución de pixel de 250 x 250 m. Finalmente, se determinó el área cosechada de maíz y soja en 2015 (USDA-NASS, 2018a) ubicada dentro de cada DET.

## 2.2. Validación del MET

La respuesta de una determinada tecnología agrícola depende de las condiciones climática y edáfica que explora el cultivo durante su periodo de crecimiento. Por ejemplo, la respuesta a la fertilización nitrogenada depende en muchos casos de la disponibilidad hídrica almacenada en el suelo en la zona radical, así como las precipitaciones durante el barbecho y el ciclo del cultivo. Por lo tanto, el entendimiento de las características edáficas que determinan la capacidad de retención hídrica del suelo, el contenido inicial de agua disponible a la siembra, así como la oferta y demanda hídrica durante el ciclo del cultivo son relevantes para determinar objetivos

realistas de producción y decidir sobre las prácticas de manejo para lograr alcanzarlo (en este caso la dosis de un fertilizante nitrogenado). Del mismo modo, se espera por ejemplo que prácticas agronómicas como la fecha de siembra y grupo de madurez de cultivo afecten la longitud de ciclo dada las condiciones térmicas propias de cada sitio. La variable que resume estas complejas interacciones entre ambiente y práctica de manejo es el rendimiento, la cual fue utilizada para validar nuestra aproximación.

Se evaluó el MET bajo la hipótesis de que un MET robusto es capaz de delinear DETs que representen la variabilidad espacial y temporal del rendimiento para un amplio rango de clima y tipos de suelo. En otras palabras, se espera que los cambios espaciales y temporales del rendimiento estén asociados a cambios en DETs. Para probar esta hipótesis y validar el MET se utilizaron dos bases de datos independientes provenientes del Cinturón maicero de Estados Unidos: (i) datos de rendimiento de maíz en secano a nivel de condado para el periodo 2005-2014 proveniente de las estadísticas agrícolas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-NASS, 2018a). Dicha base de datos incluye un total de 1895 combinaciones de años y condados, y (ii) datos de rendimiento y prácticas de manejo (selección de cultivares, labranza, y uso de pesticidas) de soja provenientes de 3276 lotes de productores cultivados entre 2014 y 2016 (Figura 3), los cuales representan la variabilidad de rendimiento y manejo de soja del Cinturón maicero (Rattalino Edreira et al., 2017; Mourtzinis et al., 2018).



**Figura 3:** Localización de 3276 lotes de productores de soja (puntos rojos) del cinturón maicero de Estados Unidos de los cuales se colectaron datos de manejo y rendimiento de tres campañas (2014-2016). Las áreas coloreadas corresponden a 17 dominios de extrapolación de tecnología (DET) donde se ubican los lotes mencionados anteriormente. En su conjunto, los 17 DETs cubren 13.3 Mha de soja, lo que representa ca. 40% del área total de soja.

La primera validación utilizó estadísticas nacionales y consistió en evaluar los cambios en el rendimiento del maíz y su coeficiente de variación temporal (CV) entre los grupos de condados que pertenecen al mismo DET. Sólo los condados con al menos un 50% de su área de maíz ubicada dentro de un DET se incluyeron en el análisis. Un total de 239 condados fueron seleccionados y agrupados en 20 DETs. Los cambios en rendimiento y CV se evaluaron en grupos de condados con (i) diferentes zonas climáticas pero similar CRH (250–300 mm), los cuales totalizaron 14 grupos de

condados y (ii) diferentes CRH dentro de la misma zona climática, analizando 7 grupos de condados. En otras palabras, los componentes climáticos y edáficos del MET fueron evaluados por separados. El rendimiento promedio y la variación del rendimiento se calcularon para cada grupo de condados. La distribución de rendimiento y su CV se mostraron para cada grupo de condados en gráficos de caja. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon mediante la prueba de diferencias mínimas significativas (LSD) con un nivel de significancia  $\alpha=0.01$ . Además, como prueba de control, se crearon grupos de condados seleccionados aleatoriamente para evaluar cuál habría sido la variación espacial y temporal (*i.e.*, CV) de rendimiento entre los condados sin la agregación basada en el MET.

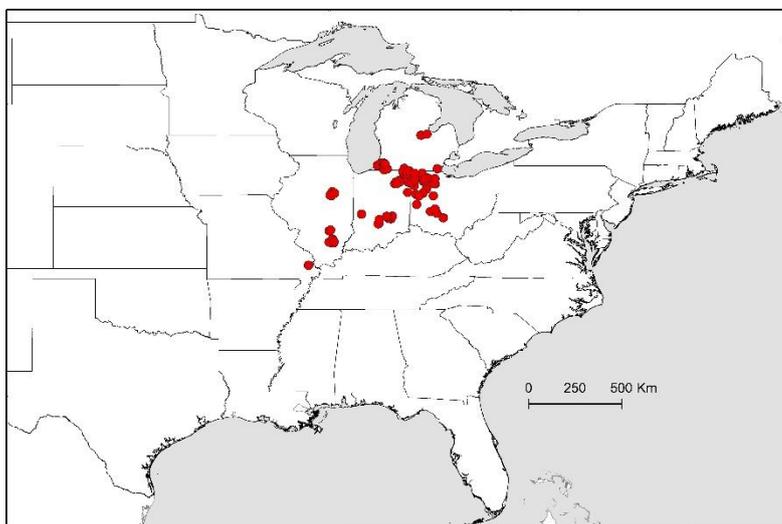
Se realizó un análisis de regresión múltiple *Stepwise* para explicar qué proporción de la variación espacial y temporal del rendimiento entre y dentro de los condados fue explicada por los atributos biofísicos del MET. Los cuatro atributos biofísicos del MET fueron utilizados para dicho análisis, a excepción de la estacionalidad de temperatura la cual fue idéntica entre los condados. La regresión múltiple incluyó todos los condados y años seleccionados ( $n=239$ ). Los parámetros derivados del análisis incluyeron:  $R^2$  ajustado, estimadores de rendimiento, error estándar, valor T, y valor p. Los rendimientos y coeficiente de variación fueron estandarizados previamente para reducir los efectos negativos de la distribución no normal en los análisis de regresión y ANOVA. Sin embargo, los resultados derivados de dicha transformación no cambiaron respecto a los originales, por lo que se presentaron los datos no transformados.

La segunda validación utilizó ambas bases de datos (estadísticas nacionales y lotes de productores) y consistió en examinar la partición de la suma de cuadrados del ANOVA realizado para rendimientos y las prácticas de manejo (sólo para la base de productores) entre las fuentes de variación: DET, año, y DET  $\times$  año. El análisis de los residuos de ANOVA se utilizó como una medida de la variabilidad lote a lote (base de datos de soja a nivel lote) y como condado a condado (base de datos de maíz a nivel de condado) dentro de los DET. Para este análisis se agrupar los lotes de soja en función de sus propiedades climáticas y edáficas utilizando el MET y se seleccionaron aquellos DET con  $>100$  lotes a modo tal de basar los análisis posteriores en una muestra representativa de cada DET (Mourtzinis et al., 2018).

### 2.3.Caso de estudio para demostrar la aplicabilidad del MET

Actualmente, existe en los Estados Unidos un programa denominado NutrientStar® ([www.nutrientstar.org](http://www.nutrientstar.org)), liderado por el “Fondo para la defensa del medioambiente” (Environmental Defense Fund), cuyo objetivo es evaluar el desempeño de fertilizantes para mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y reducir su impacto ambiental. En 2015, NutrientStar® estableció una red de 96 experimentos de maíz a campo en el Cinturón maicero de Estados Unidos (Figura 4). La ubicación de estos ensayos se utilizó como un caso de estudio para evaluar el uso potencial del MET para determinar donde deberían haberse localizado dichos ensayos para que sus resultados puedan ser extrapolados a mayores áreas de cultivo. Para tal fin, se comparó la distribución actual de los ensayos de NutrientStar® con dos diseños hipotéticos. El primero, destinado a alcanzar la misma representatividad de cultivo que el diseño original, pero reduciendo

el número de sitios. El segundo, destinado a maximizar la representatividad de cultivo utilizando el mismo número de experimentos que el diseño original (96 sitios). El área de maíz representada por la red de ensayos de NutrientStar® y las distribuciones de ensayos hipotéticas se calcularon como la suma del área de maíz dentro de los DET donde, al menos un sitio experimental fue (NutrientStar) o será (distribuciones hipotéticas) ubicado.



**Figura 4:** Localización de una red experimental desinada a testear fertilizantes y otros productos asociados que fue utilizada para evaluar el uso potencial del marco especial de dominios de extrapolación de tecnología para mejorar la eficiencia en la distribución de sitios experimentales. Los puntos rojos indican la localización de 96 sitios experimentales.

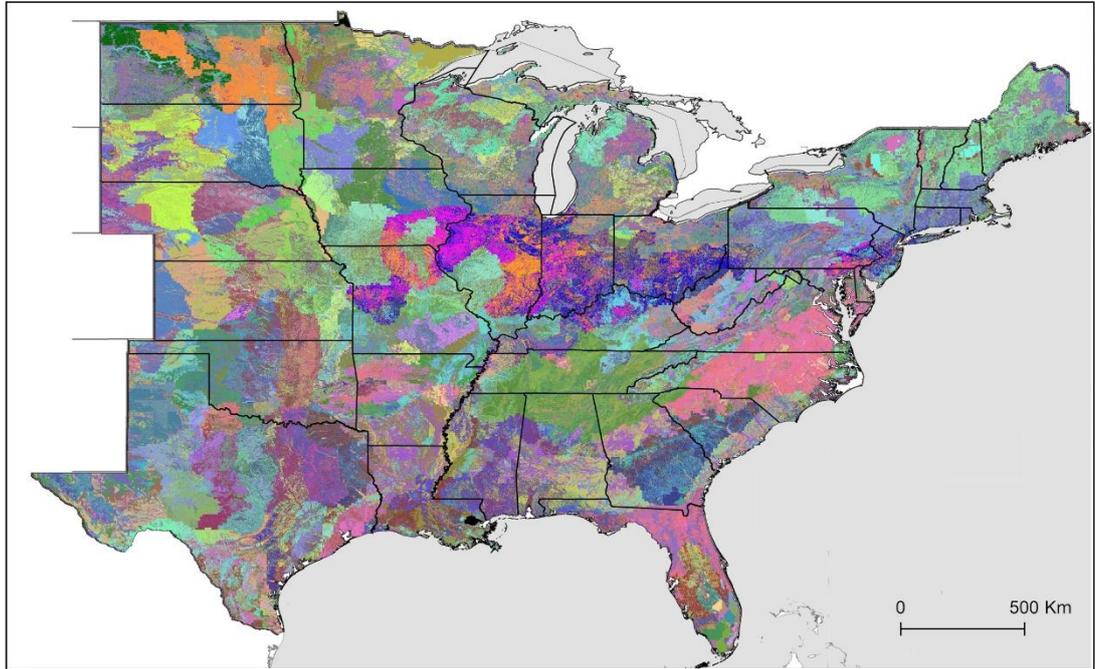
Todos los procedimientos basados en el uso de mapas fueron realizados mediante ArcGIS® y los análisis estadísticos mediante Infostat® y R (R Development Core Team, 2019).

### 3. Resultados y Discusión

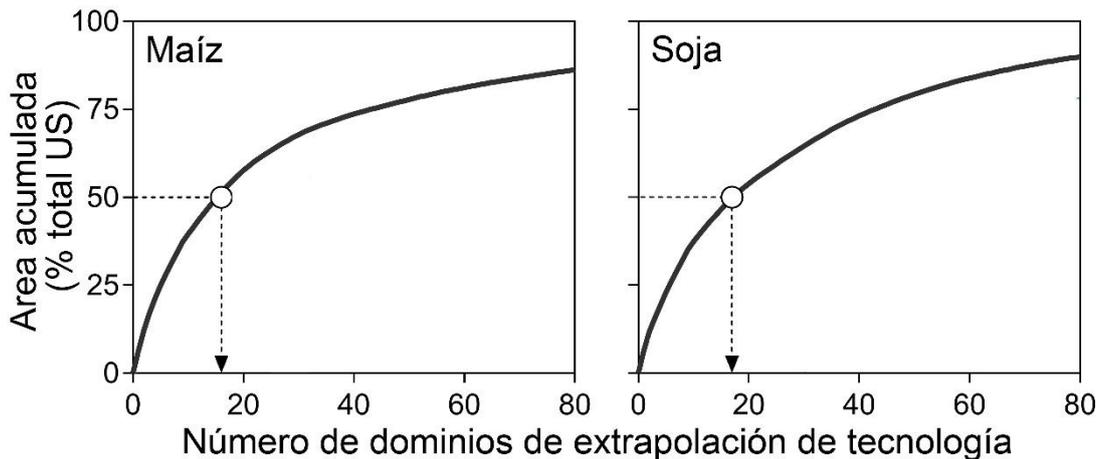
#### 3.1. Descripción del MET

Estimar el número de zonas requeridas para alcanzar una representatividad del área total de cultivo deseada es esencial para una eficiente evaluación de una nueva tecnología que asegure que los experimentos a campo sean localizados en los ambientes de producción más importantes. El desafío es alcanzar la máxima representatividad del área de producción total del cultivo utilizando el mínimo número de sitios, lo cual reduce los costos, incrementa el impacto potencial de la investigación a campo, y aumenta el retorno a la inversión. El MET desarrollado en este estudio distingue 620 DETs en la región Centro-Norte de Estados Unidos (Figura 5), los cuales generalmente delimitar áreas contiguas. Cuando se computó el área de maíz y soja dentro de cada DET, podemos observar que es posible alcanzar, por ejemplo, el 50% de representatividad del área de producción de cultivo total con tan sólo 16 (maíz) y 18 (soja) experimentos a campo localizados en los 16 y 18 DETs con mayor área de maíz y soja, respectivamente (Figura 6). Alcanzar niveles de representatividad de cultivo por encima del 50% del área total de maíz y soja requiere un número incremental de

estudios a campo en nuevos DETs debido al aumento decreciente del área de cultivo acumulada que se produce con la adición de cada DET proveniente de regiones marginales.



**Figura 5:** Dominios de extrapolación de tecnología (DET) para la región Central-Norte de Estados Unidos. Cada color representa una combinación diferente de (i) grados-días anuales acumulados, (ii) índice de aridez, (iii) estacionalidad de temperatura, y (iv) capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular (van Wart et al., 2013; Soil Survey Staff, 2016). En la región Central-Norte existen un total de 620 DETs y cada DET generalmente delinea áreas contiguas.

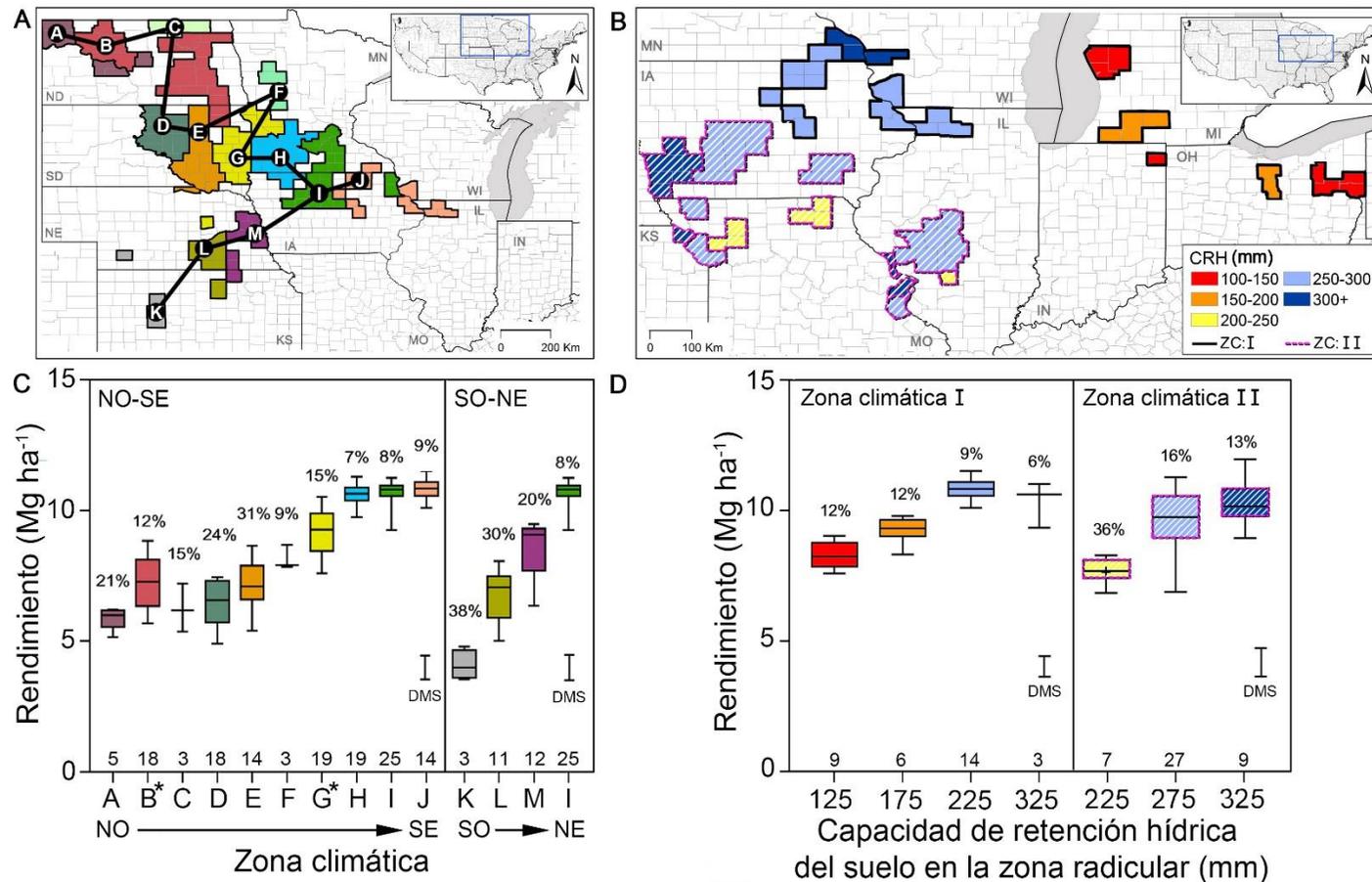


**Figura 6:** Área acumulada de maíz y soja en función del número de dominios de extrapolación de tecnología (DETs). Los DETs fueron arreglados de mayor a menor según el área de maíz y soja dentro de cada región (USDA-NASS, 2018b). Las líneas segmentadas indican la cantidad de DETs necesarias para alcanzar el 50% de la extensión total de cada cultivo. El área total de maíz y soja fue 34 y 33 Mha, respectivamente.

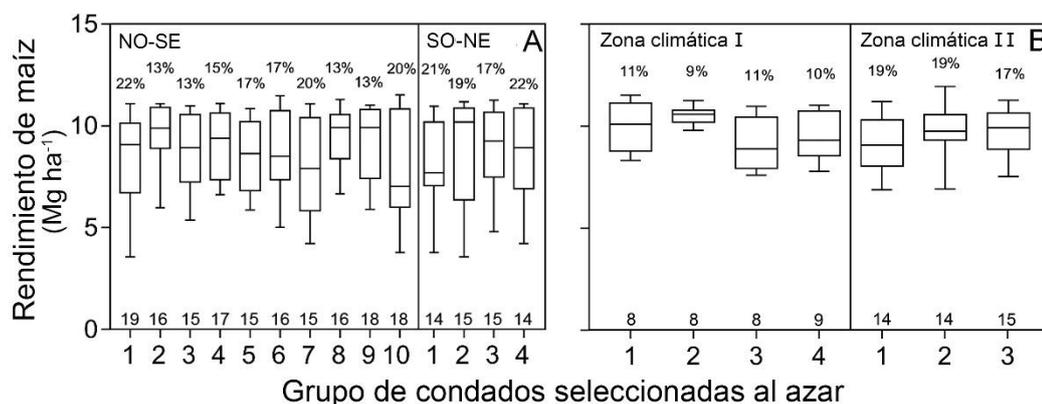
El ejemplo provisto anteriormente, al igual que el caso de estudio que se presentara en la sección 3.3, se basa en las siguientes asunciones. En primer lugar, asume que un experimento por DET es suficiente para capturar la respuesta del cultivo a una tecnología data dentro de ese DET. En segundo lugar, asume que no existen riesgos de perder sitios experimentales a causa de factores adversos impredecibles como granizo, inundaciones, o fuerte infestaciones de insectos, plagas, y enfermedades. Cabe destacar que en muchos casos puede resultar conveniente incluir más de un sitio por DET para contemplar la ocurrencia de eventos imprevistos, e incluso dar prioridad a los DETs con mayor área de cultivo o donde se espera que la tecnología que se está evaluando tenga el mayor impacto en el rendimiento y la calidad ambiental.

### 3.2. Validación del MET

La validación del MET consistió en evaluar su habilidad para predecir la variación del rendimiento de maíz y soja en el cinturón maicero en dos dimensiones, espacial y temporal. El análisis espacial del rendimiento de maíz a nivel condado reveló que las diferencias en los rendimientos promedio y los CV asociados entre grupo de condados variaron con cambios en el tipo de clima y de suelo. Por ejemplo, los condados con CRH similares (250–300 mm) pero ubicados en diferentes zonas climáticas mostraron diferencias significativas en el rendimiento promedio y el CV en las dos transectas direccionales en la región Centro-Norte de Estados Unidos (Figura 7A,C). En la dirección NO a SE, tanto el rendimiento promedio como la estabilidad del rendimiento aumentaron hacia el SE debido a una estación de crecimiento más larga y un índice de aridez más bajo (es decir, mayor suministro de agua). En la dirección SO a NE, los rendimientos y la estabilidad del rendimiento también aumentaron debido al índice de aridez más bajo. De manera similar, los condados ubicados en la misma zona climática, pero con diferentes CRH mostraron rendimientos crecientes y CVs decrecientes en DETs con mayor CRH (Figura 7B,D). Estas tendencias son consistentes con las observadas en estimaciones de potencial de rendimiento de secano realizadas mediante un modelo de simulación de maíz validado para la región de estudio que tiene en cuenta los efectos de la lluvia, el régimen de temperatura, y la CRH (Grassini et al., 2009; Yang et al., 2017). Por el contrario, una selección aleatoria de condados no identificó diferencias en el rendimiento y CV entre las regiones (Figura 8).



**Figura 7:** Grupo de condados con (A) similar capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular (CRH) pero diferentes zonas climáticas (cada color y letra corresponde a una zona climática diferente) y (b) (A) similar zona climática (I y II) pero diferente CRH (cada color corresponde a una CRH diferente) en el cinturón maicero de los Estados Unidos. Líneas conectoras en (A) corresponden a las transectas que van de NO a SE y de SO a NE. Rendimiento de maíz promedio y su variabilidad temporal a lo largo de diferentes (C) zonas climáticas y (D) tipos de suelo s. Las letras en (C) fueron asignadas a distintas zonas climáticas siguiendo la dirección NO-SE y SO-NE. La variación en el rendimiento promedio dentro y entre grupos de condados en (A) y (B) es mostrada en gráficos de caja en (C) y (D), respectivamente. Las cajas indican los percentiles 25, 50, y 75, mientras que las barras de error indican el mínimo y máximo valor de rendimiento dentro de cada grupo de condados. Los valores arriba del eje indican el número de condados dentro de cada zona climática (C) o CRH (D). El valor porcentual arriba de las cajas muestra el coeficiente de variación interanual. La barra DMS representa la diferencia mínima significativa de rendimiento entre zonas climáticas (C) o CRH (D) para un nivel de significancia de 0.01. Dos zonas climáticas fueron descartadas del análisis de DMS por presentar diferente varianza ( $\alpha = 0.01$ ) respecto al resto de las zonas climáticas (indicadas con asterisco).



**Figura 8:** Variación de los rendimientos de maíz en diferentes grupos de condados seleccionados al azar del conjunto de condados escogidos para validar el marco espacial de extrapolación de tecnología (ver Figura 7A, B). Los grupos de condados pertenecen a DETs con (A) diferentes zonas climáticas pero similar CRH (250–300 mm), y (B) diferentes CRH dentro de la misma zona climática. La caja indica los percentiles 25, 50 y 75, y las barras de error indican el rendimiento mínimo y máximo. Los valores debajo de las cajas indican el número de condados en cada grupo y el valor porcentual sobre las cajas indica el coeficiente de variación interanual del rendimiento. Esta figura ilustra que, a diferencia del agrupamiento basado en el MET, una selección aleatoria de condados no identificó diferencias en el rendimiento y CV entre las regiones para un nivel de significancia de 0.01.

Debido a que la mayoría de los productores de maíz de Estados Unidos utilizan fertilizantes y medidas modernas de control de plagas para minimizar las pérdidas de rendimiento asociadas a deficiencias de nutrientes y daño de plagas, los rendimientos promedio de secano son relativamente altos, aproximadamente el 80% de los rendimientos potenciales de secano (van Wart et al 2013). Esto determina que el clima y la CRH tienen una influencia dominante en la variación del rendimiento, y en menor medida variables socioeconómicas como acceso a insumos y mercado. Esto se comprueba mediante un análisis de regresión múltiple que indicó que tres de los cuatros componentes del MET explicaron el 56 y 37% de la variación del rendimiento de maíz a nivel condado y su CV, respectivamente (Tabla 1).

**Tabla 1:** Parámetros de la regresión múltiple (Stepwise) entre rendimiento de maíz (valor nominal y coeficiente de variación) y los componentes del marco espacial de extrapolación de tecnología (MET). Los parámetros incluyen los estimados y  $R^2$  parcial de cada componente del MET, el error estándar, el valor T y el valor p. Todos los componentes del MET fueron incluidos, excepto la estacionalidad de la temperatura dado que la misma no difirió entre los condados seleccionados para la validación del MET.

Variable	$R^2$ ajustado	Componente MET	$R^2$ parcial	Estimado $\pm$ error estándar	Valor T	Valor p
Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.56	Intercepto		3.71 $\pm$ 0.91	-4.1	<0.0001
		CRH	0.07	0.015 $\pm$ 0.002	18.6	<0.0001
		GD	0.01	-0.0007 $\pm$ 0.0001	6.9	<0.0001
		Índice de aridez	0.48	0.0011 $\pm$ 0.00006	-4.5	<0.0001
CV (%)	0.37	Intercepto		29.22 $\pm$ 6.25	4.7	<0.0001
		CRH	0.02	-0.044 $\pm$ 0.014	-3.1	0.0023
		GD	0.14	0.011 $\pm$ 0.001	10.6	<0.0001
		Índice de aridez	0.21	-0.004 $\pm$ 0.0004	-10.0	<0.0001

CRH: capacidad de retención hídrica del suelo en la zona radicular (en milímetros); GD: grados-día de desarrollo anual (en °Cd); CV: coeficiente de variación del rendimiento para el periodo 2005-2014.

Del mismo modo, el análisis temporal del rendimiento de maíz a nivel de condado reveló que el MET fue capaz de explicar las diferencias de rendimiento en la mayoría de los años evaluados. El análisis de los datos maíz mostró que los DETs representaron el 81% de la suma de cuadrados (excluyendo el error) y explicaron cuatro veces más que la contribución del año y la interacción DET x año (Tabla 2). Este hallazgo concuerda con los resultados del análisis de rendimiento y prácticas de manejo de soja a nivel de lote a través del cinturón maicero que muestra que entre 80% y 99% de la varianza (excluyendo el error) en el rendimiento y el manejo pueden explicarse solamente por los DET, mientras que el término del año (incluido DET x año) explicó menos del 20% de la variación en todos los casos (Tabla 3). En resumen, el MET se evaluó satisfactoriamente en su capacidad para distinguir regiones con diferentes niveles de rendimiento, estabilidad de rendimiento, y prácticas de manejo para dos cultivos (maíz y soja), dos escalas espaciales (condado y lote), y dos dimensiones (temporal y espacial) sobre una región geográfica con una gran diversidad en clima y suelo que representa aproximadamente un tercio de la producción mundial de maíz y soja. Ningún estudio anterior ha evaluado cuantitativamente la efectividad de un MET para caracterizar el rendimiento de la producción de cultivos de esta manera.

**Tabla 2:** Análisis de la varianza del rendimiento de maíz a nivel condado a través de 10 años (2005-2014) y 20 dominios de extrapolación de tecnología (DETs) localizados en el cinturón maicero de Estados Unidos. El análisis incluyó 239 condados con >50% del área de maíz localizada en un único DET. Los condados pertenecientes a la misma DET fueron agrupados para el análisis. El modelo explicó el 67% de la varianza total.

Variable (y unidades)	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	%SC <sup>a</sup>	Valor P
Rendimiento de maíz a nivel condado (Mg ha <sup>-1</sup> )	DET	19	4201	81.2%	<0.01
	Año	9	984	18.4%	<0.01
	DET x año	167	14	<1%	<0.01
	Residuo	1699			

<sup>a</sup> %SC: proporción de la suma de cuadrados relativa a la suma de cuadrados total no atribuible al error.

**Tabla 3:** Análisis de la varianza del rendimiento de soja y distintas prácticas de manejo (labranza, grupo madurez, y aplicación de pesticidas foliares) reportados por productores para lotes de soja sembrados durante 2014-2016 a lo largo de 17 dominios de extrapolación de tecnologías (DETs) localizados en el cinturón maicero de Estados Unidos. Los datos de rendimiento y manejo se colectaron de 3276 lotes de soja mediante encuestas a productores.

Variable (y unidades)	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	%SC <sup>a</sup>	Valor <sup>b</sup> p
Rendimiento en grano de soja (Mg ha <sup>-1</sup> )	DET	16	134692	81%	<0.01
	Año	2	17941	10%	<0.01
	DET x año	32	14600	9%	<0.01
	Residuo	3275			
Labranza (% de lotes con labranza cero)	DET	16	66	80%	<0.01
	Año	2	1	1%	0.30
	DET x año	32	16	19%	<0.01
	Residuo	3193			
Grupo de madurez (sin unidades)	DET	16	864	99%	<0.01
	Año	2	1	<1%	0.08
	DET x año	32	9	1%	0.03
	Residuo	3001			
Pesticida foliar * (% lotes aplicados)	DET	16	76	81%	<0.01
	Año	2	1	1%	0.07
	DET x año	32	17	18%	<0.01
	Residuo	3275			

<sup>a</sup> %SS: proporción de la suma de cuadrados relativa a la suma de cuadrados total no atribuible al error.

<sup>b</sup> nivel de significancia de 0.01

\* Los pesticidas foliares incluyen fungicidas y/o insecticidas.

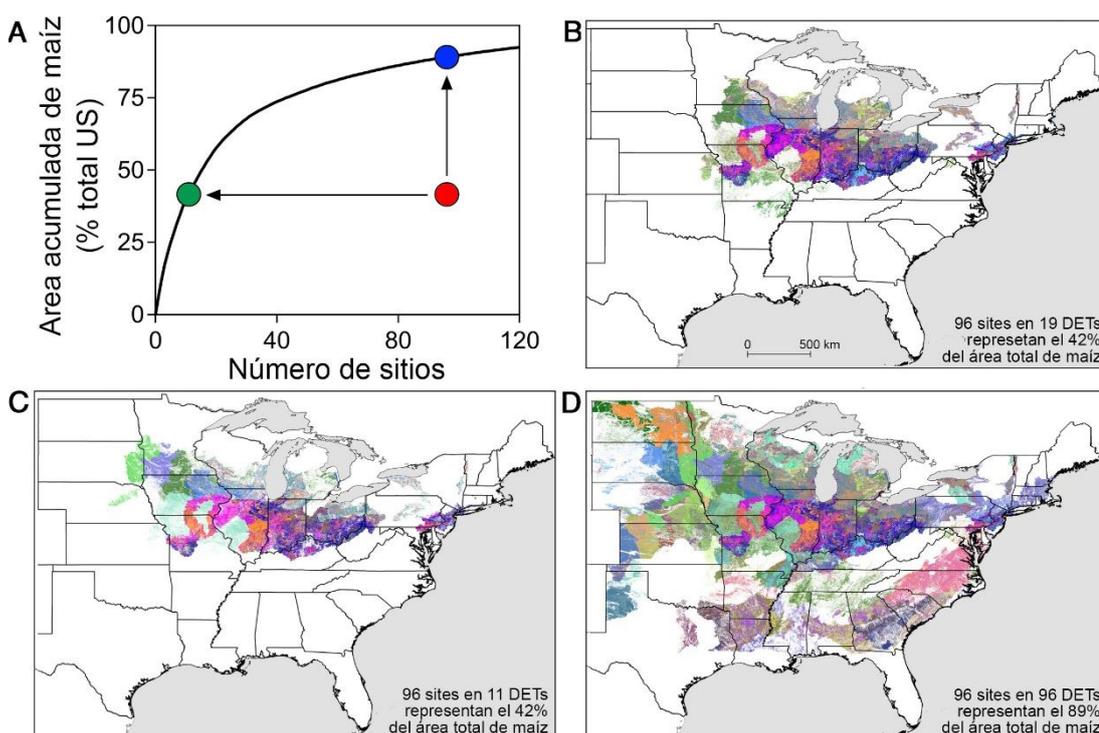
Los resultados sugieren que el MET es robusto para capturar la influencia de factores biofísicos claves para la productividad de cultivos y su variabilidad y, por extensión, para capturar diferencias en la respuesta de los cultivos a prácticas de manejo y suelos que dependen de la cantidad y confiabilidad del abastecimiento de agua y la duración del ciclo de cultivo en sistemas de secano.

### 3.1. Dominios de extrapolación tecnológica como herramienta para mejora la evaluación de tecnologías a campo

Dado el alto costo del tiempo y la mano de obra necesaria para implementar estudios replicados en lotes de producción, el MET presentado aquí puede ayudar (i) a optimizar la cantidad de ambientes abarcados por una red de experimentos a campo mediante la maximización de la representatividad del área de cultivo o, alternativamente, la reducción del número de sitios sin sacrificar la representatividad del área de cultivo, (ii) seleccionar ambientes específicos en función de los atributos biofísicos de los DET para probar una tecnología donde es más probable que tenga el mayor impacto, (iii) delinear el dominio de extrapolación de los resultados provenientes de ensayos a campo para aumentar el impacto de dichos ensayos, y (iv)

facilitar la transferencia de tecnología a través de los DET analógicos ubicados en diferentes regiones geográficas.

El potencial para mejorar la eficiencia de un programa de experimentación a campo es ilustrado en la Figura 9A. La línea curva representa la extensión del área de producción de cultivos para un número dado de ensayos a campo si cada sitio está ubicado en un único DET, comenzando desde el origen con DETs que incluyen el área de producción de cultivos más grande hasta aquellas con el área más pequeña a la derecha. Por lo tanto, cualquier red de experimentos a campo puede compararse con esta línea de "frontera de eficiencia" para identificar oportunidades para alcanzar una mayor representatividad del área de cultivo.



**Figura 9:** Dominios de extrapolación de tecnología (DET) de una red de 96 experimentos a campo realizados en 2015. (A) La frontera de eficiencia representada por la línea curva muestra la representatividad máxima del área de maíz que puede obtenerse para un número dado de sitios si cada experimento se asignara a un único DET, comenzando por el DET con mayor área de cultivo (a la izquierda del gráfico) hasta aquellos DET con área más pequeña (a la derecha del gráfico). La asignación original de los 96 sitios mostró que muchos estaban ubicados en el mismo DET, de modo que sólo se situaron en 19 DET y alcanzaron una representatividad del 42% del área total de maíz según lo indica el punto rojo en (A). Los DET en los cuales se ubicaron los ensayos de campo se muestran en (B). La ubicación estratégica de los experimentos a campo consistió en situar cada experimento en un único DET con el objetivo de (C) alcanzar la misma representatividad del área total de cultivo inicial, pero reduciendo el número de ensayos en un 90% (punto verde en A), o (D) relocalizar los 96 sitios experimentales a los DETs de mayor área, alcanzando una representatividad del área de maíz del 89% (punto azul en A).

Para ilustrar este punto, se evaluó la representatividad del área de maíz de una red de 96 experimentos realizados en 2015 en campos de productores para evaluar un producto que mejora la eficiencia del uso de fertilizantes de maíz de secano. Los 96 sitios fueron localizados dentro de 19 DETs (Figura 9B) que representaron el 42% del área total de maíz en Estados Unidos (punto rojo en Figura 9A). En contraste, la reasignación estratégica de cada experimento a un único DET y aquellos con mayor área de cultivo lograría la misma representatividad del área total de cultivo con sólo 11 experimentos (Figura 9C y punto verde en Figura 9A), o duplicaría la representatividad si cada uno de los 96 ensayos se reasignara a un único DET (Figura 9D y punto azul en Figura 9A).

#### **4. Conclusiones**

Lograr altos rendimientos y al mismo tiempo un uso eficiente de recursos que permita minimizar la huella ambiental representa un desafío importante que requiere inversiones adecuadas en investigación y desarrollo, así como una priorización eficiente y efectiva de estas inversiones. Del mismo modo, una vez que se desarrollan nuevas tecnologías, se necesitan nuevos enfoques para impulsar su transferencia más rápida para lograr una adopción generalizada en la región de estudio y otras regiones con similares características biofísicas. Un marco espacial sólido que determine "dominios de extrapolación" de nuevas tecnologías representa una herramienta esencial para lograr estos objetivos. Dicho marco espacial debe tener en cuenta los factores más importantes que gobiernan la productividad de los cultivos y el desempeño ambiental sin requerir un número excesivo de variables y categorías. Los resultados de la validación cuantitativa del MET presentado aquí son prometedores. Por un lado, se ha demostrado que el MET es capaz de capturar los efectos del clima y los factores dominantes del suelo responsables de la variación espacial y temporal del rendimiento de cultivos de secano. Por otra parte, este estudio ilustró la utilidad del MET para facilitar una mayor eficiencia en la evaluación de nuevas tecnologías y lograr la adopción de aquellos que mejoran los rendimientos, estabilidad del rendimiento y beneficios al tiempo que se reducen los impactos ambientales negativos al delinear el área donde es probable que funcionen mejor. Cabe destacar que este MET es lo suficientemente flexible para incluir otras variables que influyen en el rendimiento de una tecnología determinada o su adopción por parte de los agricultores, incluida la irrigación, otros factores biofísicos como el pH del suelo, el contenido de materia orgánica o la pendiente del terreno, así como factores socioeconómicos, como la distancia al mercado, el tamaño de productor, etc. Una versión on-line del MET se encuentra disponible en <http://nutrientstar.org/about-teds/>. El archivo *raster* del MET está disponible en [www.yieldgap.org/cz-ted](http://www.yieldgap.org/cz-ted).

## **Agradecimientos**

Esta investigación fue financiada por la Fundación Bill y Melinda Gates, Daugherty Water for Food de la Universidad de Nebraska-Lincoln (UNL, por sus siglas en inglés), el Programa de Investigación de Soja de la región Centro-Norte de Estados Unidos (NCSRP, por sus siglas en inglés), el Fondo de Defensa Ambiental de los Estados Unidos (EDF, por sus siglas en inglés) y el Programa de Investigación de CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS, por sus siglas en inglés), que se lleva a cabo con el apoyo de los donantes del Fondo CGIAR y mediante acuerdos de financiamiento bilateral. Agradesco al Dr. Shawn Conley y Spyridon Mourtzinis (Universidad de Wisconsin-Madison) por sus esfuerzos para recopilar los datos de la encuesta de soja utilizados para uno de los análisis presentados en este estudio.

## **Bibliografía**

- Danvi, A., Jütten, T., Giertz, S., Zwart, S.J., Diekkrüger, B., 2016. A spatially explicit approach to assess the suitability for rice cultivation in an inland valley in central Benin. *Agric. Water Manag.* 177, 95-106.
- FAO, 1978. Report on the agro-ecological zones project. World Soil Resources Report 48, Rome, Italy.
- FAOSTAT, 2019. Crops and livestock trade database. [www.faostat.fao.org](http://www.faostat.fao.org).
- Fischer, G., Shah, M., van Velthuisen, H., Nachtergaele, F.O., 2002. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and Results. IIASA, Laxenburg, Austria.
- Grassini, P., Pittelkow, C.M., Cassman, K.G., Yang, H.S., Archontoulis, S., Licht, M., Lamkey, K.R., Ciampitti, I.A., Coulter, J.A., Brouder, S.M., Volenec, J.J., Guindin-Garcia, N., 2017. Robust spatial frameworks for leveraging research on sustainable crop intensification. *Global Food Security* 14, 18-22.
- Grassini, P., Specht, J.E., Tollenaar, M., Ciampitti, I.A., Cassman, K.G., 2015. High-yield maize–soybean cropping systems in the US Corn Belt. In: Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Eds.), *Crop physiology. Applications for genetic improvement and agronomy*. Oxford: Academic Press, pp. 15-42.
- Grassini, P., Yang, H., Cassman, K.G., 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1254-2165.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25, 1965-1978.
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., Navarro Garcia, J., 2016. Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Res.* 197, 97-106.
- Kouadio, L., Newlands, N.K., 2015. Building capacity for assessing spatial-based sustainability metrics in agriculture. *Decision Analytics* 2, 2.
- Lawes, R.A., Oliver, Y.M., Robertson, M.J., 2009. Integrating the effects of climate and plant available soil water holding capacity on wheat yield. *Field Crops Res.* 113, 297-305.
- Leenaars, J.G.B., Claessens, L., Heuvelink, G.B.M., Hengl, T., Ruiperez González, M., van Bussel, L.G.J., Guilpart, N., Yang, H., Cassman, K.G., 2018. Mapping rootable depth and root zone plant-available water holding capacity of the soil of sub-Saharan Africa. *Geoderma* 324, 18-36.
- Licker, R., Johnston, M., Foley, J.A., Barford, C., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Ramankutty, N., 2010. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world? *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 769-782.

Mourtzinis, S., Rattalino Edreira, J.I., Grassini, P., Roth, A.C., Casteel, S.N., Ciampitti, I.A., Licht, M., Kandel, H., Kyveryga, P.M., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Naeve, S.L., Nafziger, E., Specht, J.E., Stanley, J., Staton, M.J., Conley, S.P., 2018. Sifting and winnowing: Analysis of farmer field data for soybean in the US North-Central region. *Field Crops Res.* 221, 130-141.

Padbury, G., Waltman, S., Caprio, J., Coen, G., McGinn, S., Mortensen, D., Nielsen, G., Sinclair, R., 2002. Agroecosystems and land resources of the Northern Great Plains. *Agron. J.* 94, 251-261.

Pardey, P.G., Chan-Kang, C., Dehmer, S.P., Beddow, J.M., 2016. Agricultural R&D is on the move. *Nature Comment* 537, 301-303.

R Development Core Team, 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Conley, S.P., Roth, A.C., Ciampitti, I.A., Licht, M., Kandel, H., Kyveryga, P.M., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Naeve, S.L., Nafziger, E., Specht, J.E., Stanley, J., Staton, M.J., Grassini, P., 2017. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agric. For. Meteorol.* 247, 170-180.

Singh, V.P., Minh, V.Q., Singh, A.N., Kam, S.P., 1999. Ecosystem analysis-based methodology for technology extrapolation. In: Balasubramanian, V., Ladha, J.K., Denning, G.L. (Eds.), *Resource Management in Rice Systems: Nutrients*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 213-229.

Soil Survey Staff, 2016. National Value Added Look Up (valu) table database for the Gridded Soil Survey Geographic (gSSURGO) Database for the United States of America and the Territories, Commonwealths, and Island Nations served by the USDA-NRCS. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2006. Land Resource Regions and Major Land Resource Areas of the United States, the Caribbean, and the Pacific Basin. *Agricultural Handbook 296* digital maps and attributes. Available online.

USDA-FSA-APFO, 2016. The Geospatial Data Gateway. National Elevation Dataset 10 Meter. [www.datagateway.nrcs.usda.gov](http://www.datagateway.nrcs.usda.gov).

USDA-NASS, 2018a. USDA-National Agricultural Statistics Service (NASS), Crop U.S. State and County Databases. [www.nass.usda.gov](http://www.nass.usda.gov).

USDA-NASS, 2018b. USDA-National Agricultural Statistics Service (NASS), National Cultivated Layer. [www.nass.usda.gov](http://www.nass.usda.gov).

van Bussel, L.G.J., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K.G., Van Ittersum, M.K., 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Res.* 177, 98-108.

van Wart, J., van Bussel, L.G.J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N., Claessens, L., van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Res.* 143, 44-55.

Williams, A., Hunter, M.C., Kammerer, M., Kane, D.A., Jordan, N.R., Mortensen, D.A., Smith, R.G., Snapp, S., Davis, A.S., 2016. Soil water holding capacity mitigates downside risk and volatility in US rainfed maize: Time to invest in soil organic matter? *PLoS ONE* 11, e0160974.

Wood, S., Pardey, P.G., 1998. Agroecological aspects of evaluating agricultural R&D. *Agric. Sys.* 57, 13-41.

Yang, H., Grassini, P., Cassman, K.G., Aiken, R.M., Coyne, P.I., 2017. Improvements to the Hybrid-Maize model for simulating maize yields in harsh rainfed environments. *Field Crops Res.* 204, 180-190.

Zomer, R.J., Trabucco, A., Bossio, D.A., Verchot, L.V., 2008. Climate change mitigation: a spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 126, 67-80.