

La modelación biofísica y agroclimática

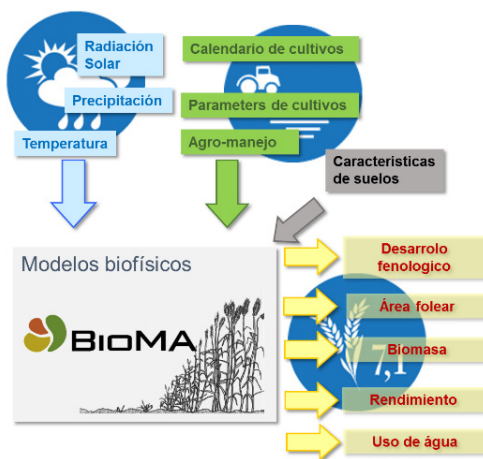
Asimilación y aplicación de la plataforma BioMA en Cuba para evaluar los impactos del cambio climático y opciones de adaptación



Autores:

Ranses J. Vázquez Montenegro
 Joysee Mariela Rodríguez Baide
 Dayron Chang Domínguez
 Davide Fumagalli
 Antonio Zucchini
 Roger Rolando Rivero Jaspe
 Lázaro Manqueira López
 Francisco Soto
 Walfredo Torres de la Noval
 Rogelio Morejón Rivera
 Osmany Roján Herrera
 Daniel Álvarez Sierra
 René Florido Bacallao
 Naivy Hernández Córdoba
 Luis Rivero
 Roberto Morales Morales
 Maurits van den Berg

2019



Esta publicación es un Informe Técnico del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC, por sus siglas en inglés). La producción científica expresada no implica una posición política de la Comisión Europea ni de ninguno de los institutos colaboradores. Los límites geográficos presentados en una o más de las figuras son puramente una representación gráfica y solo tienen la intención de ser indicativos. Los límites no reflejan necesariamente la posición oficial de la Comisión Europea ni la de los institutos colaboradores. El resultado científico expresado no implica una posición política de la Comisión Europea. Ni la Comisión Europea, ni los institutos colaboradores ni nadie que actúe en su nombre se responsabilizarán del uso que pudiera hacerse de esta información.

Información de contacto

Maurits van den Berg
Ranses J. Vázquez

maurits.vandenberg@ec.europa.eu
ranses.vazquez@insmet.cu

JRC Science Hub

<https://ec.europa.eu/jrc>

JRC112180

EUR 29290 ES

PDF ISBN 978-92-79-88850-2 ISSN 1831-9424 doi:10.2760/306030

Luxemburgo : Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 2019

© Unión Europea, 2019

Reproducción autorizada, con indicación de la fuente bibliográfica. La política relativa a la reutilización de los documentos de la Comisión Europea fue establecida por la Decisión 2011/833/UE (DO L 330 de 14.12.2011, p. 39).

Cualquier uso o reproducción de fotografías u otro material que no esté sujeto a los derechos de autor de la Unión Europea requerirá la autorización de sus titulares.

Cómo citar este informe: Vázquez RJ, Rodríguez Baide JM, Chang Domínguez D, Fumagalli D, Zucchini A, Rivero Jaspe RR, Manqueira López L, Soto F, Torres de la Noval W, Morejón Rivera R, Roján Herrera O, Álvarez Sierra D, Florido Bacallao R, Hernández Córdoba N, Rivero L, Morales Morales R, van den Berg M. *La modelación biofísica y agroclimática: Asimilación y aplicación de la plataforma BioMA en Cuba para evaluar los impactos del cambio climático y las opciones de adaptación*. EUR 29290 ES, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo, 2019, ISBN 978-92-79-88850-2, doi:10.2760/306030, JRC112180.

Todas las imágenes © Unión Europea 2019, excepto las dos fotografías en la parte inferior de la página principal y las fotografías en la Figura 7, Ranses Vázquez; y los logotipos en la página principal y la página ii, que son propiedad de los respectivos institutos.

La modelación biofísica y agroclimática: Asimilación y aplicación de la plataforma BioMA en Cuba para evaluar los impactos del cambio climático y opciones de adaptación

Ranses J. Vázquez Montenegro¹

Joysee Mariela Rodríguez Baide²

Dayron Chang Domínguez ¹

Davide Fumagalli²

Antonio Zucchini²

Roger Rolando Rivero Jaspe ¹

Lázaro Manqueira López ³

Francisco Soto³

Walfredo Torres de la Noval³

Rogelio Morejón Rivera³

Osmany Roján Herrera³

Daniel Álvarez Sierra³

René Florido Bacallao³

Naivy Hernández Córdoba³

Luis Rivero⁴

Roberto Morales Morales⁴

Maurits van den Berg²

1) Instituto de Meteorología, Cuba

2) Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (por sus siglas en inglés JRC)

3) Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Cuba

4) Instituto de Suelos de Cuba

Instituciones colaboradoras



Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas



Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola



Instituto de Suelos

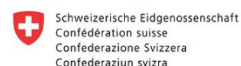


IMPLEMENTADO POR:



Al servicio
de las personas
y las naciones

FINANCIADO POR:



Embajada de Suiza en Cuba

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE

Tabla de contenidos

Instituciones colaboradoras	ii
Prefacio	iv
Resumen ejecutivo	vi
1. Antecedentes	1
2. ¿Qué es BioMA?	2
3. Etapas de trabajo en el contexto de la transferencia de BioMA a Cuba a través del proyecto BASAL	8
4. Ejemplos de resultados obtenidos en la modelación agroclimática	13
5. Ejemplos de resultados obtenidos en la modelación biofísica con BioMA ...	17
6. Consideraciones finales	35
7. Referencias	40
Lista de figuras	42
Lista de tablas	45

Prefacio

Este informe resume el trabajo realizado para hacer la transferencia de la plataforma BioMA a Cuba y sus primeras aplicaciones para evaluar los impactos del cambio climático y de opciones de adaptación del agro-manejo. Estos trabajos fueron conducidos en el contexto del proyecto BASAL (Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local), un proyecto de cooperación de Cuba con la Unión Europea, que pretende reducir las vulnerabilidades relacionadas con el cambio climático en el sector agrícola a nivel local y nacional.

Los logros presentados en este informe se relacionan con el resultado 3 de BASAL, y más específicamente 3.1.2: Identificación de las tendencias de los impactos previsibles del cambio climático en la producción de alimentos a mediano plazo (modelación de los impactos de la variabilidad y del cambio climático sobre los rendimientos agrícolas).

Informe Integral Resultado 3 “Entregadas herramientas género-sensibles para enfrentar los impactos del cambio y la variabilidad climática y hacer más sostenible la producción de alimentos, a las autoridades locales y nacionales”.

Este informe documenta cómo se implementó el sistema; ilustra la cantidad de trabajo involucrado y las diferentes habilidades que se necesitan; y proporciona varios ejemplos de su utilidad una vez implementado.

Una primera versión de este informe fue distribuida al Taller Final de las actividades desarrolladas por el proyecto BASAL con la colaboración del Joint Research Center de la Unión Europea: “Los modelos WEAP y BIOMA como herramientas en apoyo a la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario cubano”, celebrado el 1 de diciembre de 2017 en La Habana, Cuba.

El trabajo descrito aquí se benefició mucho de la colaboración con EUROCLIMA¹, un programa de cooperación regional entre la Unión Europea y América Latina enfocado en el cambio climático (www.euroclima.org). Varias herramientas desarrolladas para EUROCLIMA se utilizaron para BASAL y viceversa; y algunos informes fueron publicados bajo la bandera de ambas iniciativas. En este contexto, las experiencias descritas en este informe también pueden servir como ejemplo o fuente de inspiración para institutos de otros países de América Latina y el Caribe que deseen implementar un sistema similar.

Se agradece a todos los profesionales en el presente estudio quienes contribuyeron con sus datos y a las instituciones que cobijaron e impulsaron los trabajos de investigación. Específicamente, agradecemos el Instituto de Suelos, el INCA nacional y la estación Los Palacios, el IAgriC, el ICA y el MINAG que contribuyeron en la conformación y la búsqueda de información de datos de cultivo, de suelo, de manejo agrícola y la identificación de las áreas de cultivo.

¹ Más específicamente, de las actividades de desarrollo, investigación, creación de capacidad y aplicación de modelación biofísica, que se llevó a cabo dentro del marco del componente tres: Agricultura Sostenible, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático, de la segunda fase de EUROCLIMA.

Resumen ejecutivo

¿Por qué?

La adaptación de la producción agraria a la variabilidad del clima y a los cambios climáticos, debe pasar indefectiblemente por una revalorización del papel de las ciencias conexas en la producción de alimentos y al establecimiento de un sistema de monitoreo, vigilancia y predicción/evaluación del clima y sus impactos, del clima cuyos productos sean eficientemente utilizados por los tomadores de decisiones a muy corto, corto, mediano y largo plazo, en la agricultura, la ganadería, los bosques y las plantaciones forestales. Simultáneamente, esto debe ser acompañado de la intensificación de los esfuerzos integrados en los campos de las ciencias del clima del suelo, de los cultivos y de las ciencias humanas por obtener productos con la capacidad de guiar las acciones agrarias, tanto para aprovechar las circunstancias favorables como para disminuir los posibles impactos negativos de eventos climáticos extremos.

¿Qué es BioMA?

BioMA (Aplicaciones de Modelación Biofísica por sus siglas en inglés) es una plataforma de software diseñado para el análisis, la parametrización y la ejecución de modelos en los ámbitos de la agricultura y el medio ambiente. Este informe trata de BioMA espacial, que es la versión de BioMA que permite configurar, ejecutar, y visualizar las entradas y salidas de los modelos en unidades espaciales, tales como las celdas de cuadrícula en los mapas.

Como resultado de la modelación biofísica de cultivos, en modelos parametrizados para las condiciones de Cuba, se realizan corridas y análisis de las respuestas de las interacciones planta- ambiente-manejo en distintos escenarios de la producción de cultivos que permiten abordar las problemáticas actuales de la sostenibilidad de su producción, así como de futuros escenarios. Es una aproximación a la valoración de los posibles impactos del cambio climático sobre el sector agrícola a partir de las proyecciones climáticas obtenidas con modelo climático regional para diferentes niveles de sensibilidad climática. Ofrece valoraciones en cuanto a tendencias de rendimientos agrícolas, duración de las fases de cultivos, opciones para el manejo agrícola en cuanto a fechas óptimas y manejo de agua entre otras.

Analiza la actualidad y ofrece futuros alternativos sobre el comportamiento de los cultivos a diferentes grados de sensibilidad climática.

Pone a disposición elementos para la planificación estratégica a corto, mediano y largo plazo.

Objetivo

Apoyo a la toma de decisión en la planificación, la gestión y el manejo agrícola ante los futuros alternativos de los sistemas agrícolas.

Este informe documenta cómo se implementó el sistema; ilustra la cantidad de trabajo involucrado y las diferentes habilidades que se necesitan, y proporciona varios ejemplos de su uso y utilidad una vez implementado.

Beneficiarios

Directos: decisores en general y del proyecto, productores, técnicos e investigadores agrícolas.

Indirectos y potenciales: la sociedad cubana, (nivel local, regional y nacional). Este informe también puede servir de inspiración para institutos en otros países que desean implementar un sistema similar.

Resultados / beneficios esperados

Ofrecer información clave para evaluar impactos y contribuir a la generación de medidas de adaptación. Entre muchos otros, contribuir o favorecer:

- a la obtención e introducción de variedades de cultivos resilientes o con rendimientos potenciales superiores ante la presencia de altas temperaturas y déficit de agua,
- a los cambios en la gama de cultivos, sobre la base de estudios de regionalización de cultivos, implementados sistemáticamente a medida que evolucione el clima.
- al conocimiento de las posibilidades y limitaciones de abordar el cambio climático con pequeñas adaptaciones de gestión (por ejemplo, cambios en las fechas de siembra, variedades con características ligeramente diferentes); o la necesidad de grandes intervenciones, como la introducción de nuevos cultivos o sistemas hídricos.

En este informe presentamos algunos resultados para varios escenarios y varios modelos de cambio climático de las aplicaciones iniciales del sistema implementado. Estos sugieren, por ejemplo:

- Una disminución en los rendimientos (para arroz, -3 a -25% en 2030; para maíz, -12 a -18%), principalmente debido a (i) un acortamiento de la temporada de crecimiento como consecuencia de las temperaturas más altas y (ii) balance progresivamente más desfavorable entre la disponibilidad y los requisitos de agua;
- Variaciones en los cambios de los rendimientos dependiendo de las características locales (clima, suelo) y régimen hídrico (irrigado o de secano);
- Un potencial considerable para mitigar las pérdidas de rendimiento de arroz por cambios en las fechas de siembra y / o uso de variedades de arroz adaptadas.

Próximos pasos

Reconocemos que, para un soporte de políticas sólido, se necesita trabajo adicional, especialmente para mejorar la parametrización y realizar más pruebas de validación, y luego aplicarla a las preguntas de políticas reales.

Los próximos pasos previstos incluyen más pruebas y calibración de los modelos para los cultivos considerados hasta ahora (arroz, maíz, sorgo), así como la inclusión de otros cultivos, como el frijol, la caña de azúcar y pastos. Esto requerirá intensificar y consolidar la colaboración entre los institutos involucrados hasta ahora. Los contactos con el JRC también se espera que continúen. Por ejemplo, el JRC actualmente está probando una versión mejorada del modelo WARM (para arroz) que puede transferirse fácilmente al sistema instalado en Cuba. El compromiso continuo con la comunidad internacional de modelación agrícola, en particular AgMIP-LAC², también se considera de suma importancia. Futuras aplicaciones relevantes para la política podrían incluir, por ejemplo, un análisis más profundo de los puntos críticos del cambio climático en Cuba o las comunicaciones a la CMNUCC.

² Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (www.agmip.org)

1. Antecedentes

En el marco de la estrategia de cooperación europea con Cuba para el período 2011-2013, la UE y las autoridades cubanas acordaron trabajar en la adaptación al cambio climático en relación específica con la producción de alimentos, dando lugar al proyecto BASAL al cual la UE asignó un monto total de 7 millones de Euros. De esos 7 millones de Euros, 6.3 millones serían ejecutados por el PNUD y 700.000 por el Centro Común de Investigación (JRC) de la comisión Europea, el cual utilizó 350,000 para la transferencia de una plataforma de modelos biofísicos y para brindar asesoramiento a expertos cubanos en modelación de los impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agropecuarias.

El **objetivo** era proporcionar a los actores interesados y a los tomadores de decisiones, herramientas para apoyar la toma de decisiones fundamentadas sobre la gestión agrícola de los sistemas de cultivo y su adaptación a los escenarios climáticos proyectados.

Eso, mediante la **transferencia** y el desarrollo de la tecnología usada por la CE para evaluar los impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre el sector agropecuario - la plataforma de modelos biofísicos BioMA, la cual es el resultado de más de 25 años de trabajo, de varios colectivos de investigadores europeos.

Si bien BASAL tiene un alcance nacional, las actividades de desarrollo se centran en tres municipalidades piloto: Jimaguayú, en la provincia de Camagüey, en el centro del país, Güira de Melena en la provincia de Artemisa, al sur de La Habana, y Los Palacios, en la provincia de Pinar del Río, en el oeste de Cuba.

2. ¿Qué es BioMA?

BioMA (Donatelli et al., 2010; Fumagalli & Ferrari, 2016), Aplicaciones de Modelación Biofísica por sus siglas en inglés, es una estructura o plataforma de software diseñado y desarrollado para el análisis, la parametrización y la ejecución de modelos en los ámbitos de la agricultura y el medio ambiente. En este informe nos referimos a BioMA espacial, que es la versión de BioMA que permite configurar, ejecutar, y visualizar las entradas y salidas de los modelos en unidades espaciales, tales como las celdas de cuadrícula en los mapas.

La elección de asimilar y usar la plataforma BioMA para su aplicación en la agricultura y la situación Cubana implica considerar que:

1. El análisis de la agricultura y el cambio climático, requiere del enfoque de objetivos múltiples, medioambientales en contextos de dirección agrícola;
2. Nuevas capas de datos pertinentes se ponen a disposición para la planificación en el futuro cercano;
3. El impacto de emisiones de gases de efecto invernadero en el clima debe estudiarse con los modelos globales, pero a su vez el impacto del cambio climático en los sistemas de la producción debe analizarse a nivel local;
4. El conocimiento y las herramientas se desarrollan rápidamente y los conjuntos de datos se actualizan con frecuencia; esto requiere un sistema versátil que se pueda actualizar y adaptar fácilmente a los nuevos desarrollos.

Las aplicaciones desarrolladas sobre la base de la estructura BioMA son actualmente capaces de enfocarse en muchos aspectos relacionados a la biofísica de la producción agrícola.

Sin embargo, BioMA no es un modelo. Es una plataforma abierta para hacer disponible en un software operacional los resultados de las investigaciones en la modelación biofísico agrícola. BioMA tiene una estructura orientada al desarrollo, que permite el uso de los modelos, herramientas y componentes que la forman como objetos independientes que se pueden extender, intercambiar o usar en diversas combinaciones.

La versión actual de BioMA incluye diversos modelos:

- WARM: Simulación de Arroz (Confalonieri et al., 2009, 2010; (Stella et al., 2015)
- CropSyst: Simulador de sistemas de cultivo/cosecha genérico (Stöckle et al., 2003)
- WOFOST: Simulador de cultivo genérico (Supit et al., 1994)
- Canegro: Caña de azúcar (Singels et al., 2008, implementado en el ambiente BioMA por Stella et al., 2015)
- ClimIndices (índices climáticos)

Como ejemplo de la posibilidad de intercambiar componentes, el balance hídrico de CropSyst puede ser acoplado a los componentes fisiológicos de WOFOST, así permitiendo una comparación más refinada entre modelos y la construcción de nuevas combinaciones (llamadas en BioMA “soluciones de modelación”) en base de los componentes considerados más adecuados (dependiendo de los objetivos de la simulación y de los datos disponibles).

La transferencia de BioMA a Cuba se realizó con el apoyo del Centro Común de Investigación (JRC por sus siglas en inglés) de la Unión Europea, en colaboración directa con INSMET de Cuba e indirecta con otras instituciones como INCA, IS, IAgriC.

Como resultado de la modelación biofísica en cultivos parametrizados para las condiciones de Cuba (arroz, maíz, sorgo, frijol, pastos y forrajes etc.), se realizan corridas y análisis de las respuestas de las interacciones planta-ambiente-manejo en distintos escenarios de la producción de cultivos, que permiten abordar las problemáticas actuales de la sostenibilidad de la producción, así como de futuros escenarios.

BioMA ofrece

- Valoraciones en cuanto al comportamiento y tendencias de parámetros agrometeo/climáticos en diferentes períodos proyectados y para diferentes salidas de los Modelos Climáticos Regionales y para diferentes escenarios de emisiones y otras proyecciones.
- Valoraciones en cuanto a tendencias de rendimientos agrícolas, duración de las fases de cultivos, opciones para el manejo agrícola en cuanto a fechas

óptimas y gestión del agua, entre otras, insumos claves para tomadores de decisiones y un componente fundamental de la planificación e implementación de la adaptación de la agricultura a diferentes plazos.

- Niveles de producción o rendimiento.

Ejemplos de aspectos que se pueden explorar

Impactos de cambio climático en cultivos y sistemas agrícolas

- Efectos/impactos en el rendimiento respecto a la actualidad
- Efectos/impactos en el desarrollo de cultivos respecto a la actualidad
- Implicaciones para irrigación, uso del agua y disponibilidad
- Que áreas serán más afectadas
- Que áreas se beneficiaran
- Período de tiempo en que ocurrirán los cambios (dependiendo de la capacidad con que modelos de clima pueden predecirlo)
- Riesgo de incidencia de ciertas enfermedades fito-patógenas (*Perycularia oryzae*, en arroz; *Cercospora zea-maydis* en maíz) por ejemplo

Efectos de opciones de adaptación

- Cambios en el manejo de cultivos
- Mejoras en el manejo de agua
- Características de las variedades adaptadas (llamadas ideo-tipos)
- Cambios a otros cultivos (factibilidad, necesidad). Cómo?, Dónde?, Cuándo?...

En general las soluciones de modelación en BioMA permiten estimar el rendimiento de los cultivos tomando en cuenta variaciones en algunos de los factores que limitan el mismo, específicamente: precipitación, temperatura, prácticas de manejo del cultivo e incidencia de algunas enfermedades fitopatógenas en ciertos cultivos.

Beneficios esperados

- Aplicada a Cuba para la planificación según la variabilidad o cambio climático. Escala espacial: nacional, regional, provincial, municipal, local.

- Mejorada la capacidad de adaptación al cambio climático del sector agropecuario cubano al combinarse los siguientes beneficios:
 - Mejorado el conocimiento sobre los impactos de la variabilidad y del cambio climático en la producción de alimentos.
 - Ofrecidas herramientas en apoyo a la toma de decisiones para adaptar la gestión de los diferentes sistemas productivos a los escenarios climáticos y mejorar así su sostenibilidad.
- En términos de desarrollo y capacitación científica, la modelación biofísica pueda facilitar la estructuración adecuada de las investigaciones interdisciplinarias (con nexos entre las ciencias agrarias, meteorología, hidrología, biofísica, ciencia de los suelos que son todas de suma importancia en los estudios del cambio climático y sus impactos).

Desafíos (aspectos algunos resueltos, otros persistentes pero que servirán para superar problemas futuros)

- Calidad de los datos que alimentan los modelos.
- Conocimientos y comprensión limitados de las ventajas de la modelación, resultando en aceptación limitada.
- Necesidad de mayor interconectividad entre investigadores agrícolas y ambientales; creación de una cultura de colaboración.
- Insumos necesarios (Centro de datos para el almacenamiento de las bases de datos y corrida de los modelos) y restricciones de financiamiento. La modelación climática necesita además de hardware y software un soporte técnico adecuado para el almacenamiento y corrida de grandes bases de datos.
- Personal técnico-científico especializado. Necesita de la interacción de varios especialistas, técnicos e investigadores en diversas ramas (climática-ambiental, agrícola y computacional).
- Necesidad del montaje de experimentos agrícolas para obtener los parámetros de cultivo adecuados para alimentar los modelos. No siempre lo ya investigado y publicado responde a las necesidades de entradas de datos para los modelos de cultivos.

- Aunque los modelos biofísicos permiten evaluar las incertidumbres en los resultados (reflejando nuestro conocimiento limitado) mejor que otros enfoques; esto sigue siendo limitado y difícil de expresar de una manera que pueda ser fácilmente comprendida por los interesados no científicos.

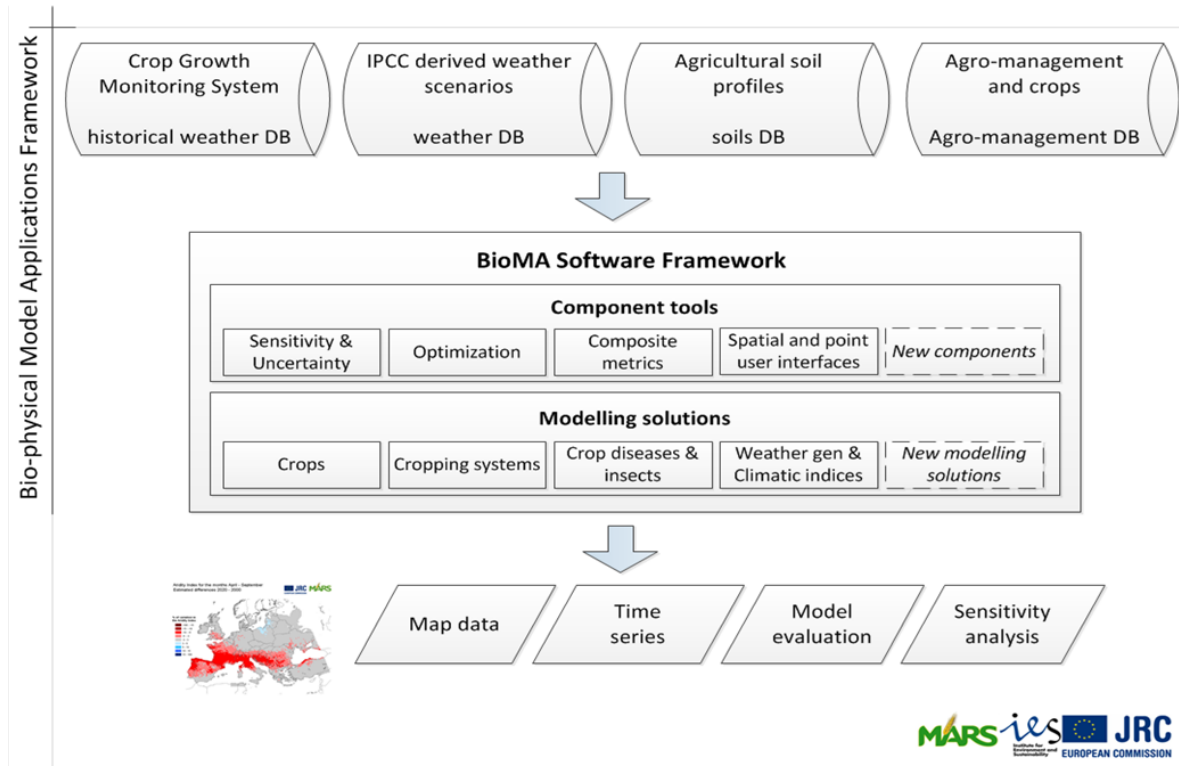


Figura 1. Componentes de la Plataforma BioMA.

La Figura 1 es un esquema de la plataforma BioMA y sus componentes internos, las salidas y entradas que requiere para ejecutar simulaciones de sistemas agrícolas. En esencia los datos de entrada esenciales son: datos climáticos históricos diarios regionalizados o de una estación de clima o sitio específico, escenarios climáticos futuros, datos de perfiles de suelo y sus propiedades físicas de retención de agua, datos sobre las prácticas agrícolas en los sitios de interés (fechas de siembra, de cosecha, cultivos sembrados, prácticas de riego), y datos específicos de los cultivos evaluados, es decir parámetros. Los componentes o herramientas de la plataforma ayudan a realizar análisis de sensibilidad y de incertidumbre, optimización de parámetros, estimaciones específicas, hacer simulaciones en sitios específicos o en áreas específicas y otros componentes como: los modelos de cultivos implementados, los modelos de desarrollo de patógenos y plagas, o el componente de índices climáticos. En cuanto a salidas, las soluciones de modelación permiten

simular crecimiento y desarrollo del cultivo en condiciones idóneas de manejo y sistemas agrícolas con algunas características específicas, riesgo de desarrollo de plagas y enfermedades o indicadores climáticos para detección de anomalías.

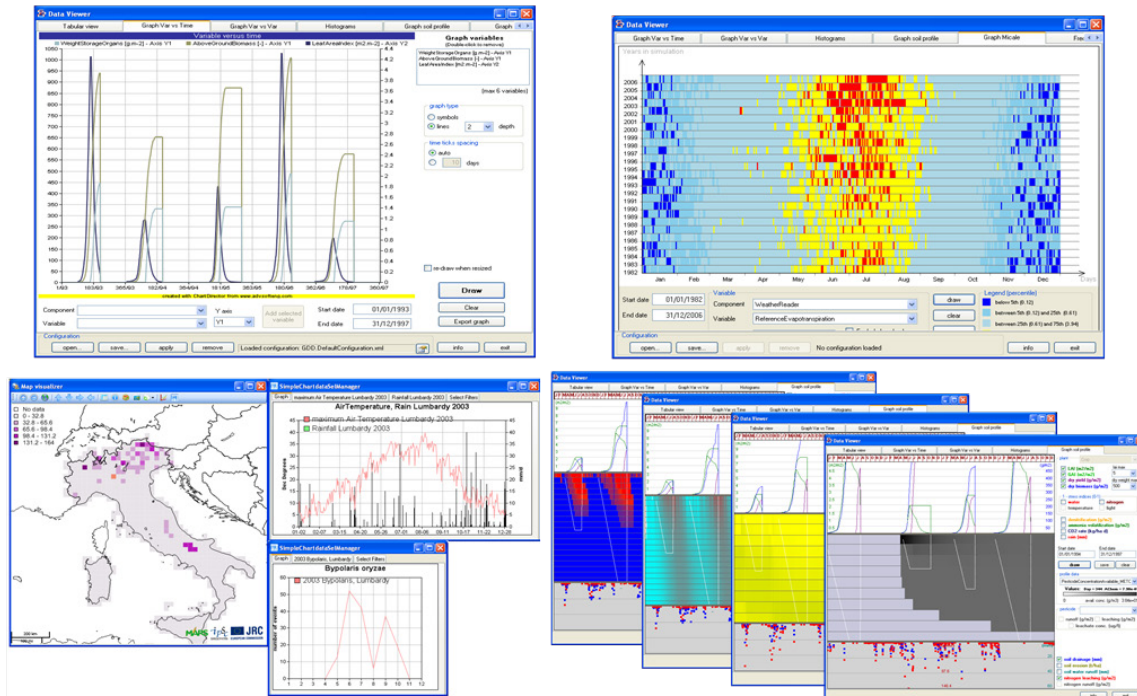


Figura 2. Resultados de salidas de la Plataforma BioMA en el contexto europeo, una vez establecidos los datos, los criterios etc. Entre ellos tenemos gráficos de: Índice de área foliar, biomasa aérea, variables agroclimáticas (evapotranspiración de referencia), contenido de agua en el suelo, temperatura del suelo, estadísticas climáticas para un punto etc.

En la Figura 2 se presenta una combinación de figuras de los tipos de salidas en formatos de graficas que la plataforma BioMA genera: perfiles de suelo y los niveles de humedad, curvas de crecimiento de biomasa de planta y de grano, series de tiempo de datos climáticos, mapas con representación de los niveles de alguna variable en cada ubicación donde se corrieron simulaciones y además graficas que combinan curvas de crecimiento y niveles de humedad del suelo.

3. Etapas de trabajo en el contexto de la transferencia de BioMA a Cuba a través del proyecto BASAL

Fase 1. Puesta a disposición de la plataforma BioMA. Despliegue de la aplicación BioMA con datos de EUROCLIMA para Cuba. Capacitación sobre BioMA.

Fase 2. Construcción de una versión contextualizada de BioMA. Adición de capas de datos; Adición de capacidades de modelación y calibración del modelo.

Fase 3. Creación de un prototipo integral del sistema de modelación. Aplicaciones para la ejecución de evaluaciones de impacto del cambio climático y desarrollo de estrategias de adaptación. Mejoras en el método de difusión de la información.

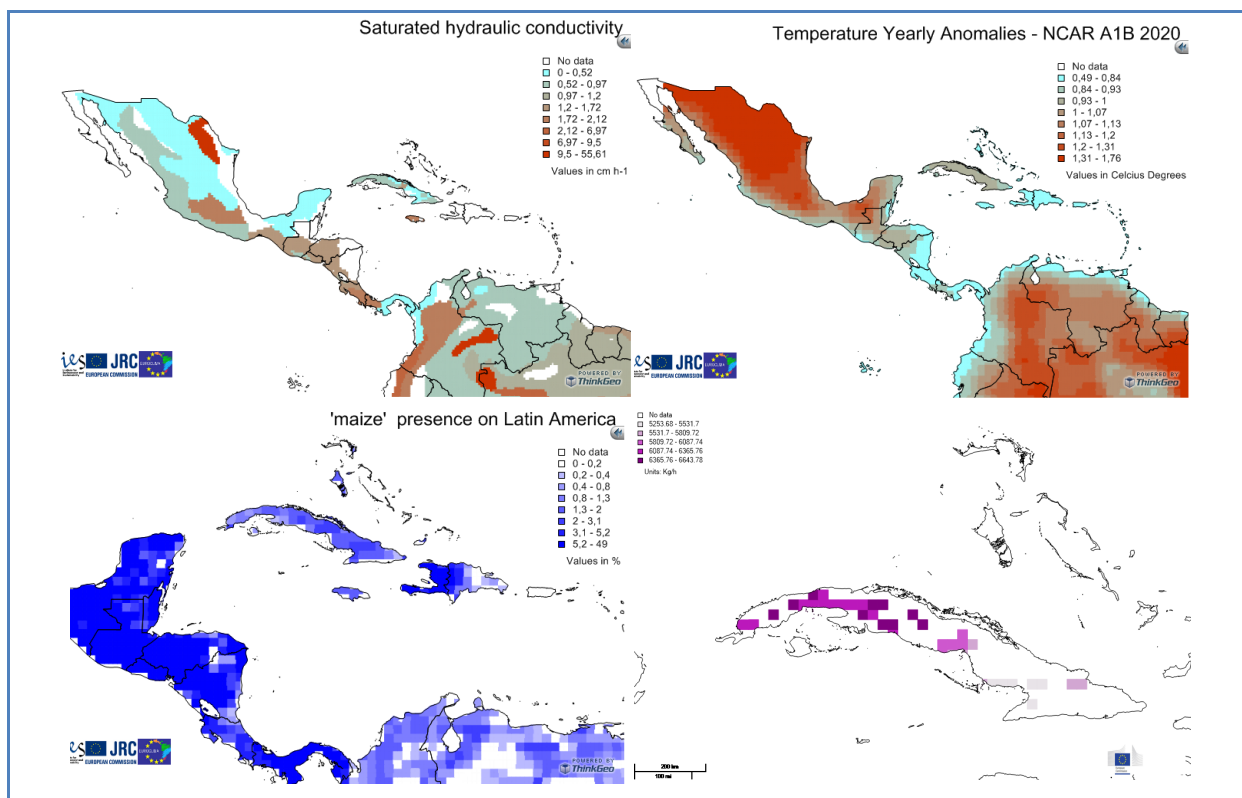


Figura 3. Datos regionalizados generados por la primera fase del proyecto EUROCLIMA para América Latina y el Caribe (climáticos, propiedades hidráulicas del suelo y presencia de cultivos,) a partir de los cuales se realizó la primera contextualización en la transferencia de BioMA para Cuba.

Se trabajó en la contextualización de la información necesaria a partir de la base creada para la primera fase del proyecto EUROCLIMA para rejillas de 25 por 25 kilómetros obtenida de rejillas globales y actualizadas a esa escala con una primera versión de los datos reales de Cuba. En la Figura 3 se muestra un conjunto de mapas

en rejilla de 25 km. para las variables biofísicas: conductividad de agua en suelo, temperatura, presencia y distribución del cultivo y precipitación.

Con dicha información y las características de cultivos también trabajados para América Latina se comenzaron a realizar modelaciones preliminares, aun con una gran incertidumbre ya que se trabaja sin ficheros de cultivos parametrizados a las condiciones de Cuba. Se muestra en Figura 4 parte del ambiente de configuración de una simulación en BiOMA con parametrización de un cultivo ideotipo y sus resultados y salidas en gráfica de curvas de biomasa potencial y con limitación hídrica.

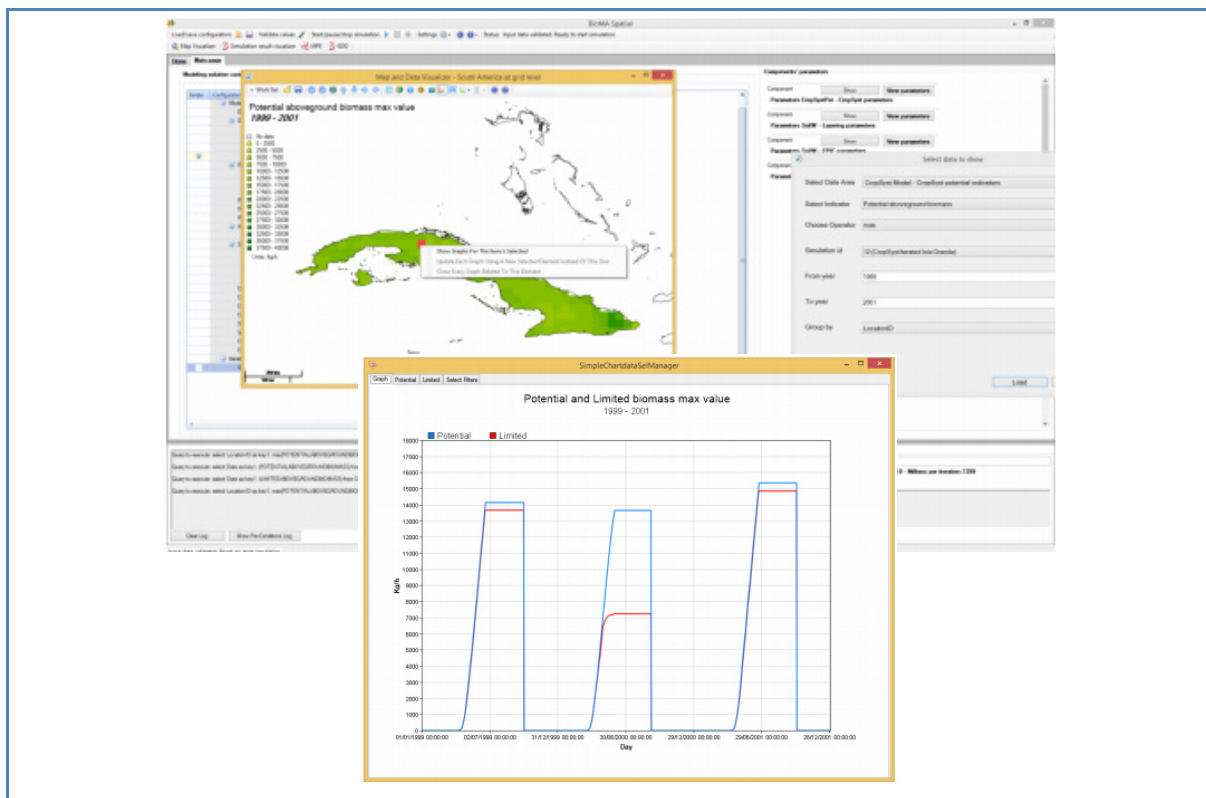


Figura 4. Modelación de maíz para toda Cuba usando una platilla de cultivo para América Latina. La gráfica representa rendimientos potenciales y limitados por agua detalle de una cuadrícula espacial en el centro de Matanzas.

Un aspecto ampliamente debatido fue la necesidad de adquirir un centro de procesamiento de datos de altas prestaciones (ver esquema de organización en Figura 5). Este facilitaría el trabajo con grandes volúmenes de datos ya que su infraestructura computacional está diseñada para realizar tareas que involucran un alto y extenso nivel de procesamiento. Por tal, es una herramienta muy útil para los científicos que necesitan de la modelación computacional.

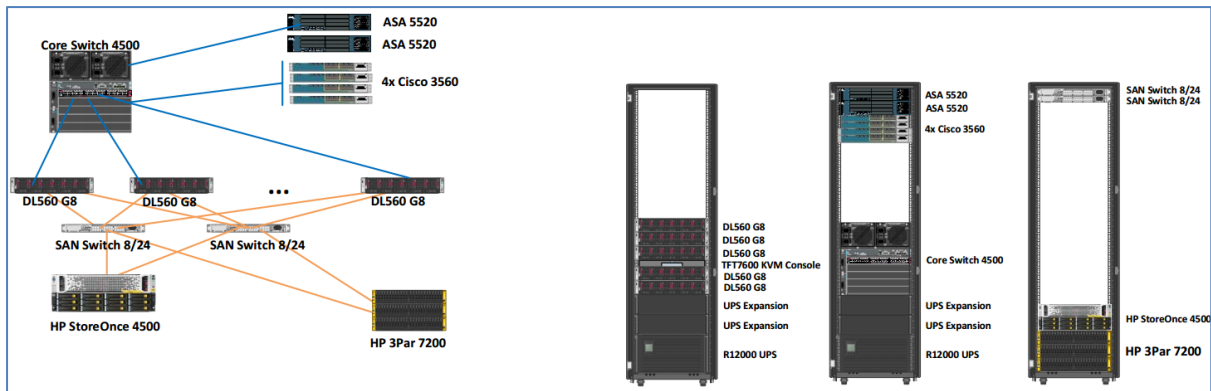


Figura 5. Centro de datos (DC) con el que BioMA para BASAL funciona. Es un conjunto de servidores que trabajan de forma sincronizada y conectados a un servidor de almacenamiento masivo donde se encuentran todos los datos necesarios para la realización de las tareas, por lo que la respuesta es obtenida de forma más eficiente y rápida.

Luego se comenzó a establecer las relaciones interinstitucionales en aras de crear un grupo de trabajo en el que el intercambio de información sería fundamental para poder alimentar la plataforma BioMA con los datos necesarios, actuales y reales de Cuba (como resumido en la Figura 6). También se pretendió aumentar la resolución espacial por cuadrículas de 25 kilómetros a 4 kilómetros.

El Instituto de Meteorología aportó la información climática (temperaturas, humedad relativa, viento, radiación, evapotranspiración) diaria histórica y la modelada por el Modelo Climático Regional (MCR) PRECIS de siete modelos y tres escenarios SRES a saber: Echam4 (A2 y B2), Echam5 (A1b), Hadley (A2 y B2), HadleyCM3 (A1b) y RCPs (2.6, 4.5 y 8.5).

El Instituto de Suelos, el INCA nacional y la estación Los Palacios, el IAgriC, el ICA el MINAG contribuyeron en la conformación y la búsqueda de información de datos de cultivo, de suelo, de manejo agrícola y la identificación de las áreas de cultivo mediante mascarar espaciales a partir del mapa de uso de la tierra.

En la Figura 6 se muestra a modo resumen, detalles de información de las propiedades del suelo para cuadrículas de 4 km de lado (esquina superior izquierda); imágenes del proceso de parametrización de cultivos a partir de datos experimentales; el calendario agrícola empleado; series temporales de las variables meteorológicas, así como el proceso de regionalización o ajuste local mediante la eliminación del error sistemático que generan los MCR.

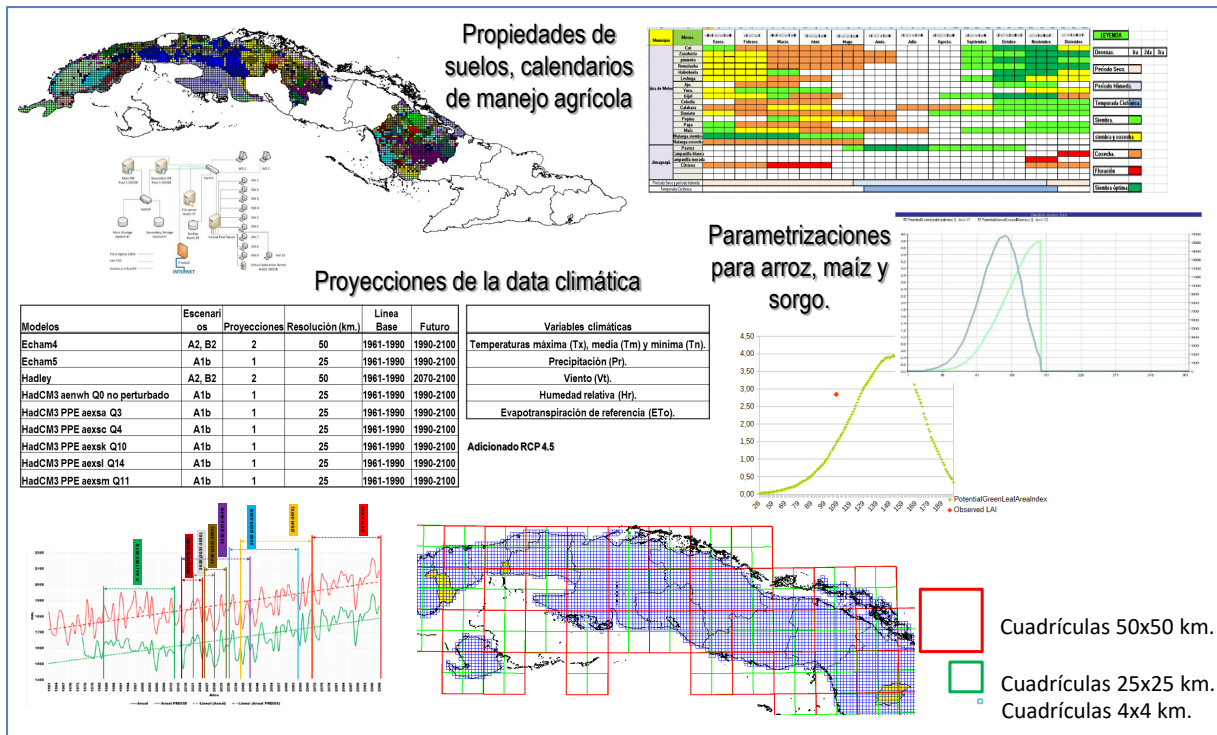


Figura 6. Resumen gráfico de toda la información recopilada con la cual se ha alimentado la base de datos del sistema de simulación con BioMA. Fuente: INSMET, Evento de socialización de resultados del componente de modelación biofísica de BASAL, diciembre 2017.

En la Figura 7 se ilustra el proceso de trabajo entre los especialistas de las instituciones que colaboraron para desarrollar el componente de modelación biofísica de cultivos de BASAL. El trabajo colaborativo entre expertos de meteorología e informática del INSMET, expertos en cultivos y suelos de las estaciones experimentales de INCA en Los Palacios (grupo de fotos a la derecha) y en Mayabeque (grupo de fotos a la izquierda) y expertos en la herramienta BioMA del JRC.

4. Ejemplos de resultados obtenidos en la modelación agroclimática

Lo esencial en este tema es mostrar la relación en la producción “de valores diarios a nivel de celdas a valores agregados en tiempo y espacio”. En cada cuadrícula o punto de rejilla, cada variable o parámetro posee 50,040 datos diarios de 130 años, la misma fue regionalizada a la climatología histórica local y para cada uno de las combinaciones de modelos y escenarios de emisiones. Como resultado se obtuvo un conjunto de más 12 proyecciones además del análisis de consenso con el que se determinaron las proyecciones de cambio climático máximas, medias y mínimas para cada cuadrícula. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de salidas para una cuadrícula.

En la Figura 8, se observa un análisis de las salidas del modelo PRECIS de las variables biofísicas evaluadas. La mayoría presenta incrementos con respecto al periodo de referencia, a excepción de los valores mínimos de la precipitación, humedad relativa y velocidad del viento que disminuyen a la vez que los valores medios y máximos de estas incrementan.

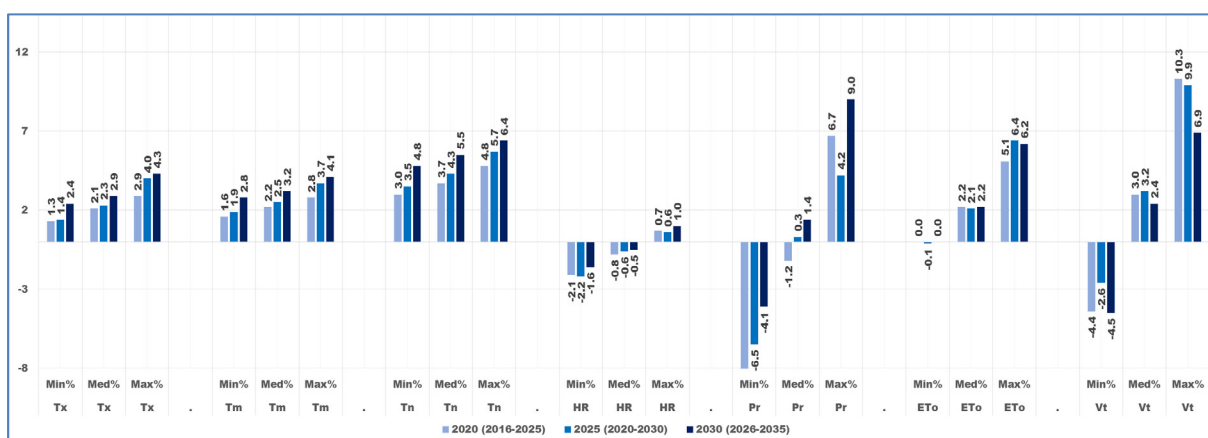


Figura 8. Variación porcentual anual respecto al período de referencia (1983-2013), y los valores mínimos, medios y máximos de los períodos climáticos proyectados al 2020, 2025 y 2030 para cada variable procesada: temperatura máxima (Tx), temperatura media (Tm), temperatura mínima (Tn), humedad relativa (HR), precipitación (Pr), evapotranspiración de referencia (ETo) y velocidad del viento (Vt), a base de las salidas de 12 proyecciones ejecutadas con el Modelo Climático Regional (MCR) PRECIS.

La Figura 10 muestra la marcha de la temperatura media anual promedio del consenso de 12 proyecciones para las tres municipalidades BASAL del 1983 al 2099

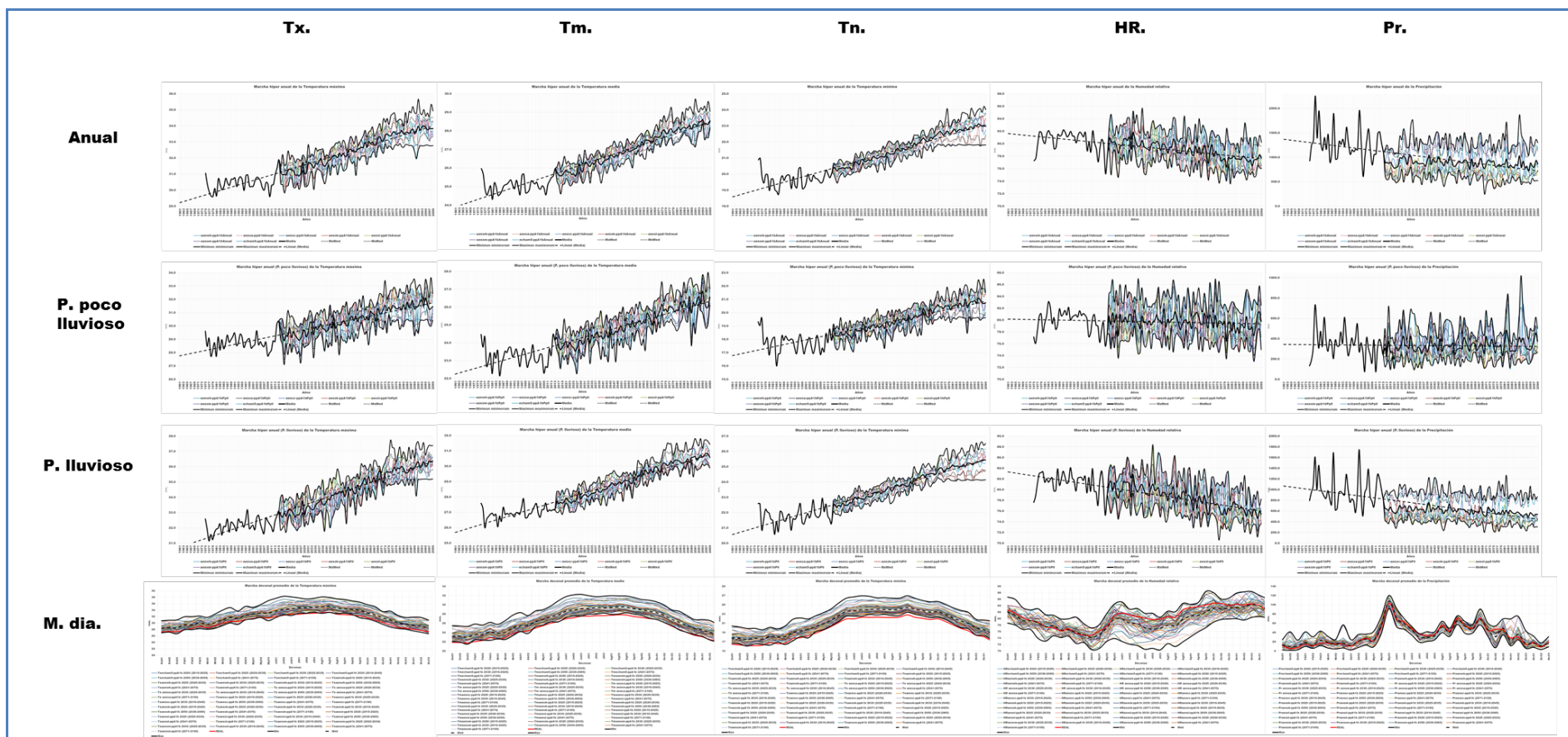


Figura 9. Resultados de una corrida en una cuadrícula para diferentes variables meteorológicas en períodos anual, lluvioso y poco lluvioso desde 1961 al 2099 y para las 12 proyecciones practicadas, así como la marcha interanual promedio para períodos climáticos promedios futuros entre 2014-2099.

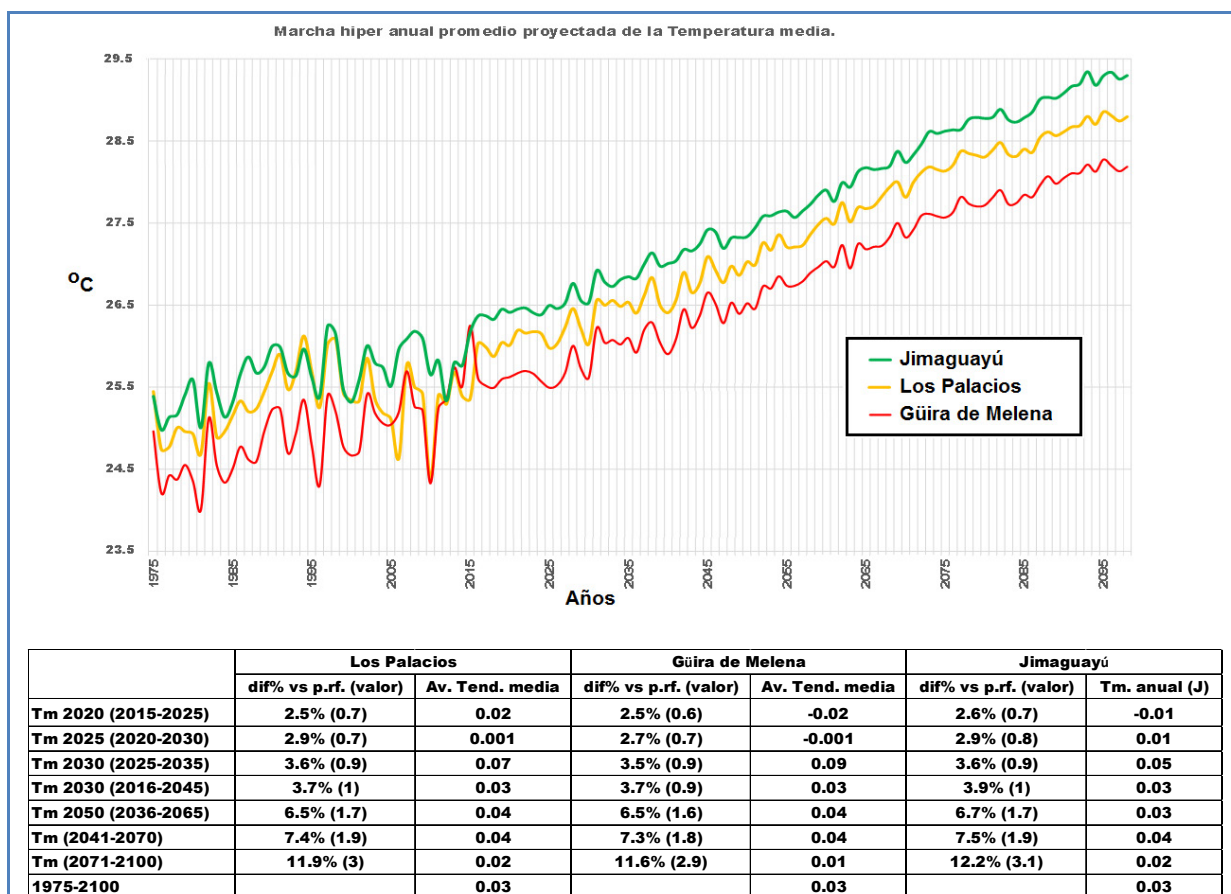


Figura 10. Temperatura media anual promedio del consenso de 12 proyecciones para las tres municipalidades BASAL. En la tabla la diferencia promedio porcentual y su equivalente en valor de unidad respecto al período de referencia (1983-2013) en períodos climáticos futuros.

Por ejemplo, para el período centrado en 2030 en la municipalidad de Jimaguayú, la tendencia positiva del aumento de la temperatura media del aire promedio anual pudiera ser un grado respecto al período de referencia.

En la Tabla 1 se muestra los resultados del análisis de consenso entre modelos/escenarios climáticos y el periodo de referencia climatológica.

Además en dicha tabla 1 se pueden distinguir las alteraciones en la duración e inicio de los periodos de la campaña agrícola según los tres en que se divide la campaña: vegetativo, húmedo y seco. Es evidente la reducción en la duración del periodo húmedo, mientras que el periodo seco presenta algunos periodos futuros donde se reducirá su duración en número de días, otros en los que se alargará con respecto al clima de referencia. Dichos análisis en la duración de ciertos periodos o etapas del ciclo agrícola deben seguir siendo explorados para entender los efectos del cambio

climático. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los modelos climáticos también tienen sus incertidumbres y por tal se hace necesario el uso de distintos Modelos Climáticos Regionales y escenarios para estos análisis.

Tabla 1. Proyecciones de inicio, fin y duración promedios de períodos vegetativos, húmedos y secos para diferentes períodos climáticos futuros. Ejemplo para el municipio de Güira de Melena. Análisis de consenso entre proyecciones y comportamiento respecto al período de referencia.

	Análisis de consenso e/ proyecciones							
	Prf (1983-2013)	2020 (2015-2025)	2025 (2020-2030)	2030 (2025-2035)	2030 (2016-2045)	2050 (2036-2065)	(2041-2070)	(2071-2100)
Inicio crecimiento principal	14	14	14	14	14	14	14	14
Fin crecimiento principal	31	32	32	31	31	30	30	33
Duración crecimiento principal	184	193	191	186	182	185	191	196
Días de crecimiento total	192	227	233	225	213	223	217	216
Inicio húmedo principal	24	24	24	24	24	24	24	24
Fin húmedo principal	29	29	29	29	29	29	29	29
Duración húmedo principal	61	60	59	59	62	65	62	56
Días húmedos total	112	94	90	96	103	96	90	76
Inicio seco principal	32	33	32	30	31	31	31	34
Fin seco principal	13	5	13	13	13	13	13	13
Duración seco principal	181	109	113	125	139	133	153	145
Días secos total	181	148	142	155	169	155	164	161
# periodos crecimiento	1	2	1	2	1	1	1	1
# periodos húmedo	2	2	2	2	2	2	2	2
# periodos seco	1	2	1	2	1	1	1	1
		Análisis del consenso respecto al p. ref.						
Inicio crecimiento principal		0	0	0	0	0	0	0
Fin crecimiento principal		1	1	0	0	-1	-1	1
Duración crecimiento principal		9	7	2	-2	1	7	8
Días de crecimiento total		35	41	33	21	31	25	21
Inicio húmedo principal		0	0	0	0	0	0	0
Fin húmedo principal		0	0	0	0	0	0	0
Duración húmedo principal		0	0	0	0	0	0	0
Días húmedos total		-21	-11	-21	-10	-20	-20	-30
Inicio seco principal		1	0	2	-1	-1	-1	1
Fin seco principal		-8	0	0	0	0	0	0
Duración seco principal		-89	0	-30	0	10	10	-10
Días secos total		-38	0	-30	0	10	10	-10

5. Ejemplos de resultados obtenidos en la modelación biofísica con BioMA

Climatología e índices climáticos

Un ejemplo de mapeo de variables climáticas en el ambiente BioMA es presentado en la Figura 11. Se presentan en esta figura ejemplos de los mapas de precipitación y temperatura para el periodo de referencia utilizado (2000-2013) y un escenario climático futuro. En ella podemos observar el impacto resultante que ejerce sobre el medio ambiente al modelar con Echam5 A1b en el entorno del 2030, aumenta la temperatura media del aire en un 13% (tomando 0°C como base) más que el periodo de referencia como promedio para todo el territorio nacional cubano, así como que la precipitación sufrirá una disminución de un 19% y la evapotranspiración de referencia aumentará en un 6%.

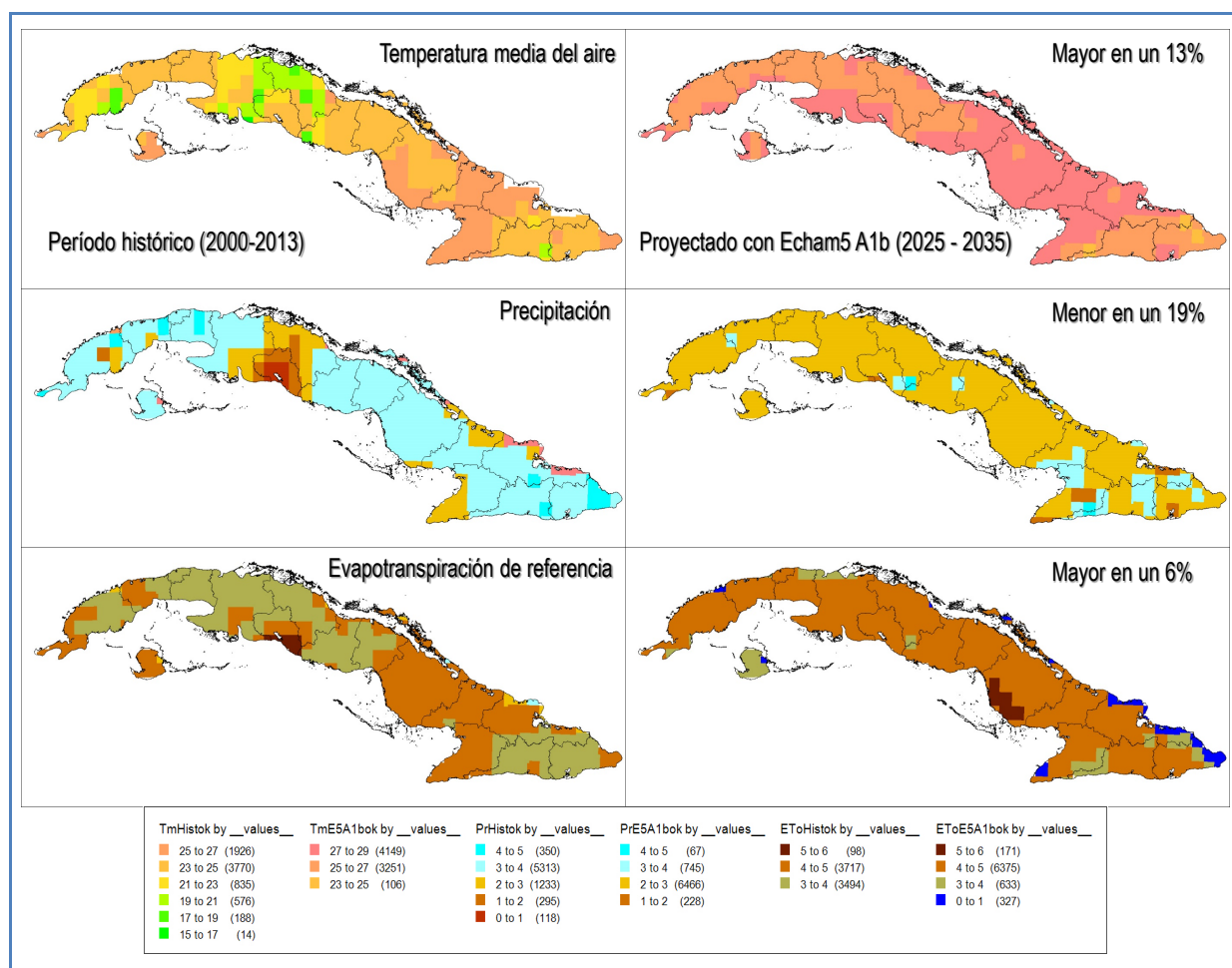


Figura 11. Mapeo en el ambiente BioMA de variables climáticas. La rejilla climática representa 25 km de lado y los años entre el 2025 y el 2030 es construcción del modelo Echam5 A1b.

Cultivos y manejo agrícola

El modelo agronómico de base representado en la Figura 12 es válido para cualquier cuadrícula, por lo que al tener estructurada la información requerida en una base de datos espacial, las iteraciones nos permiten simular eficientemente grupos de cuadrículas a la vez representativas de una granja o varias, un municipio, una región o todo el país. El manejo agrícola (fecha de siembra y de cosecha), así como los datos de parámetros específicos de los cultivos son esenciales como entradas para BioMA. Por tal, con estos elementos (cultivos y manejo agrícola) se pueden también plantear experimentos de simulación para ver como la variación en estos afectan las salidas.



Figura 12. Esquema conceptual del Modelo Agronómico sobre el cual trabajan todos los modelos de cultivos de BioMA.

Ejemplos de experimentos de simulación con cambios en cultivos o cultivares y manejo agrícola

El arroz

Se modeló arroz variedad INCA J104 parametrizado y calibrado con experimento del 2004 de la Estación del INCA Los Palacios y se aplicó los parámetros de cultivo a toda la máscara geográfica de áreas donde se cultiva arroz en Cuba. El resultado se muestra para cuadrículas de 4 km en los sitios donde se tiene información de las propiedades de los suelos. La parte superior de la Figura 13 representa la modelación con datos climáticos reales de los rendimientos promedios entre los años 2000 y 2013, mientras que la parte inferior representa los rendimientos modelados entre los

años entre el 2025 y 2035 cuyos datos climáticos son generados para la proyección Ecam5 A1b.

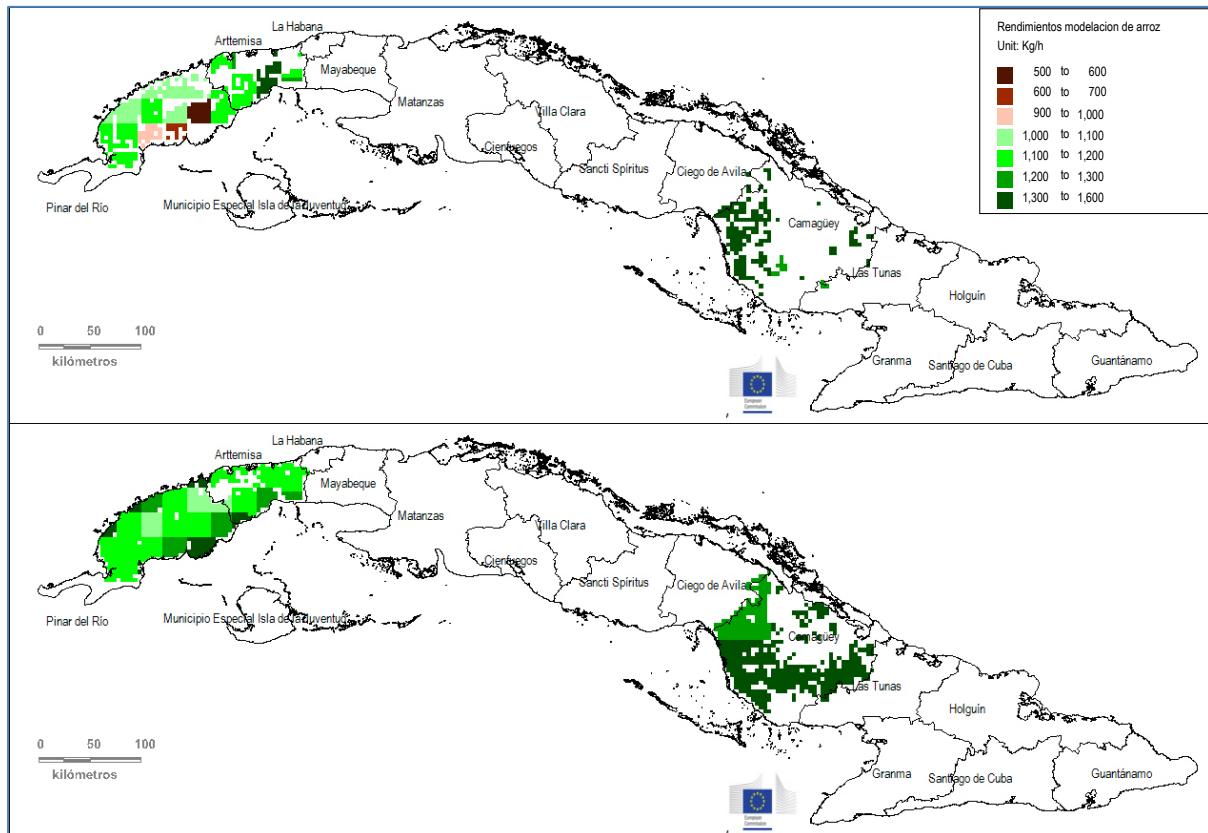


Figura 13. Mapas generados por BioMA como resultado de las corridas con el modelo WARM usando la parametrización para la variedad de arroz INCA J104, simulado en rejilla de 4x4 Km con el escenario climático del modelo Ecam5 para el escenario de emisiones A1b en los periodos 2000-2013 (parte superior) y 2025-2035 (parte inferior).

Los resultados de la Figura 13 muestran para cada una de las cuadrículas mostradas los rendimientos potenciales promedios modelados en arroz variedad INCA J104. Se aprecia una variación espacial teniendo en cuenta el comportamiento de las variables climáticas y las características de los suelos. Al aplicar la máscara de cultivos específica para las zonas con vocación arroceras podemos apreciar que en la provincia de Pinar del Río los rendimientos modelados a futuro en el entorno del 2030 aumentan un 17% aproximadamente respecto a la actualidad, mientras que las provincias de Artemisa y Camagüey experimentarían una disminución de sus rendimientos del orden de 6% y un 10 % respectivamente. Sin embargo, para cada cuadrícula también se dispone de información de salida para diferentes corridas del modelo, si de estas

corridas analizamos una cuadrícula en la localidad de Los Palacios podemos observar los siguientes resultados.

En la Figura 14 y Tabla 2, se observan las diferencias entre los rendimientos para cultivo de arroz usando la gama completa de escenarios futuros, en los niveles de producción potencial (líneas solidas) y limitado por agua (líneas punteadas) para el cultivo de arroz (INCA LP5) en Los Palacios. Se observa una clara tendencia decreciente en el rendimiento potencial del cultivo y una decreciente menos pronunciada del rendimiento limitado por agua. Esta gráfica es presentada únicamente para ilustrar las tendencias a futuro y no los rendimientos en valores absolutos, ya que se usó parámetros de cultivos no calibrados.

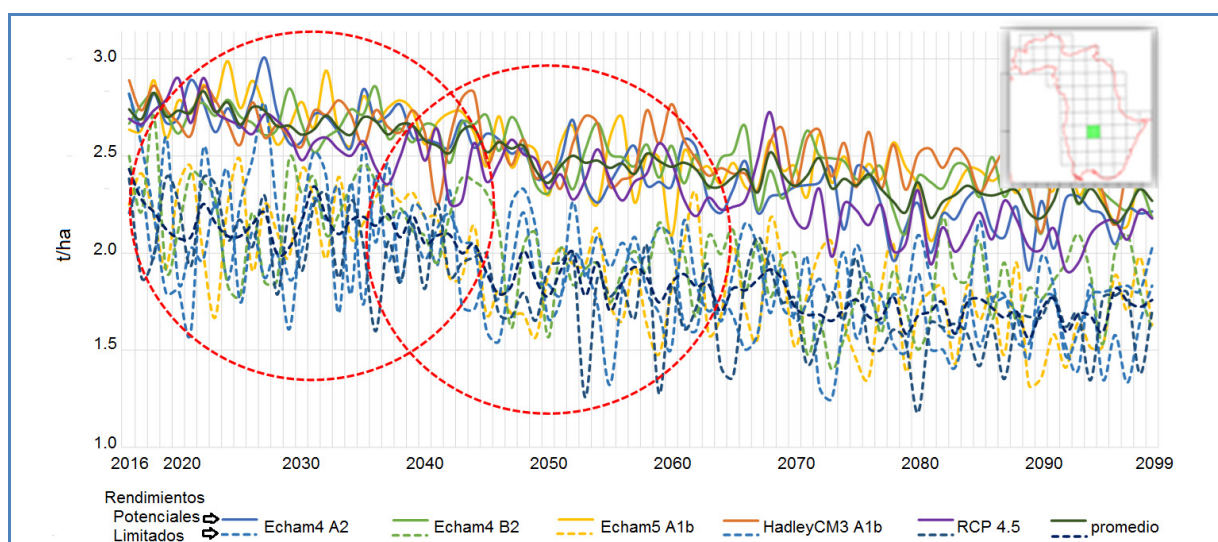


Figura 14. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos potenciales (P) y limitados (L) en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frio desde 2016 al 2099, para las 5 proyecciones climáticas de modelos Echam4 A2 y B2, Echam5 A1b, HadleyCM3 A1b y RCP 4.5, así como el promedio de estas.

Tabla 2. Promedio de las diferencias entre los rendimientos calculados con el modelo WARM para las proyecciones y para la referencia actual.

	E5A1b	E4A2	E4B2	Hcm3A1b	RCP4.5	PROM.
Pot. 2030 (% vs Ref.)	-3	-3	-4	-4	-7	-4
Pot. 2050 (% vs Ref.)	-9	-10	-9	-8	-14	-10
Lim. 2030 S/R (% vs Ref.)	-23	-23	-20	-25	-26	-23
Lim. 2050 S/R (% vs Ref.)	-31	-29	-27	-32	-36	-31

Estudio de caso del empleo de la herramienta BioMA en la calibración y validación de un modelo de simulación para la predicción del rendimiento agrícola del arroz (ORYZA SATIVA) en una empresa arrocera ante efectos del cambio climático en Los Palacios

En la municipalidad Los Palacios se aplicó la herramienta BioMA como apoyo a la planificación de la empresa agrícola arrocera. La investigación se desarrolló con el objetivo de calibrar y validar el modelo de simulación de cultivo WARM de la plataforma BioMA para la predicción del rendimiento agrícola en el cultivo del arroz ante condiciones de alta temperatura ambiental y poca disponibilidad de agua, como efectos causados por el cambio climático en Cuba. El trabajo se desarrolló en la Unidad Científico Tecnológica de Base Los Palacios, Pinar del Río. Este estudio se realizó como parte de las actividades desarrolladas dentro del proyecto Basal para la toma de decisiones a escala local ante el proceso de adaptación al cambio climático.

Para la determinación de los parámetros del modelo que definen el fichero del cultivo, se utilizaron datos de experimentos sembrados en las épocas de frío y primavera con el cultivar INCA LP-5.

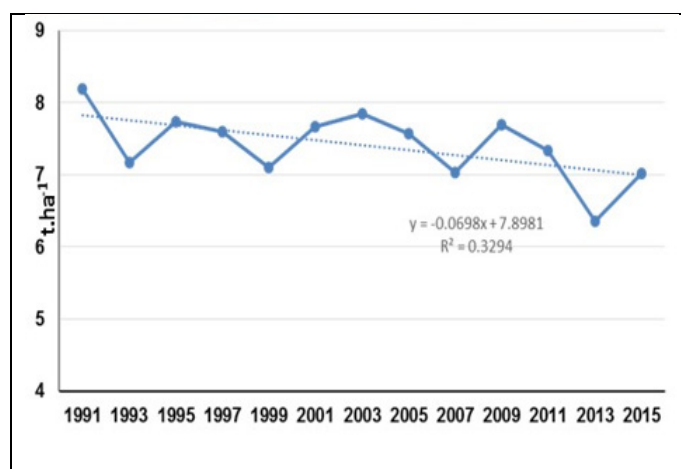


Figura 15. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos potenciales en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frío y primavera desde 1991 al 2015 aplicando las series de datos climáticos históricos de los Palacios.

En la Figura 15 se muestran los resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos en arroz (variedad INCA LP5) desde 1991 al 2015 aplicando las series de datos climáticos históricos de la estación meteorológica más próxima al sitio previsto por INSMET.

Una vez parametrizado el modelo WARM hasta lograr un ajuste aceptable, se aplicó tal parametrización del arroz INCA LP 5 a un escenario climático futuro.

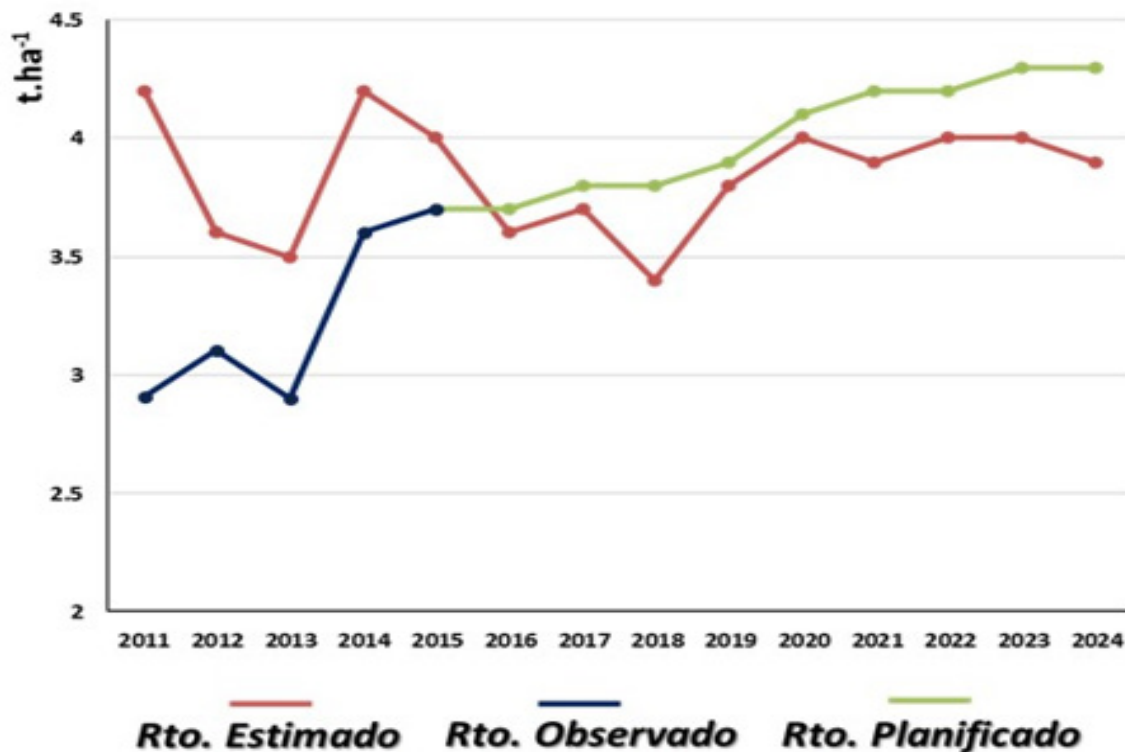


Figura 16. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos limitados con simulación de riego restringido en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frío y primavera desde 2011 al 2024 aplicando las series de datos climáticos históricos y un escenario climático en comparación a rendimiento observado y planificado.

En la Figura 16 se observa la comparación de los niveles de rendimiento observado en la empresa arrocera. En cuanto a los rendimientos observados en la empresa y el estimado por el modelo se puede ver como en cuatro de los 5 puntos comparados a pesar de que hay cierta diferencia en el nivel de rendimiento, lo cual puede estar relacionado a que el manejo y condiciones del cultivo no son las óptimas o a la necesidad, sin embargo, el modelo es capaz de predecir la variación de un año a otro lo cual indica el efecto de las variaciones meteorológicas de un año a otro en los estudiados. En el primer año (2011) se observa una discrepancia considerable lo cual podría estar relacionada a otro factor no considerados en la simulación (por ejemplo, la afectación por enfermedades o plagas) en ese año. Se observa también que en el futuro el rendimiento predicho por el modelo está más bajo que el planificado, esto

solo usando un escenario, al incluir más posiblemente los niveles de reducción pueden resultar más negativos.

El análisis integral de los resultados permitió definir que el cambio climático que implicará cambios en el comportamiento de las temperaturas del aire hasta el año 2050; provocará afectaciones en el rendimiento potencial de arroz entre 15 y 20 %.

También afectaciones en el rendimiento (pudieran ser superiores al 50 %) se apreciarán producto a la baja disponibilidad de agua sobre todo por aspectos relacionados con la distribución de las lluvias en las áreas de productores donde la siembra del cereal depende de precipitaciones más que de los grandes embalses. Esto, unido a las variaciones que pueden ocurrir en la duración de las fases fenológicas que modificaran el patrón establecido para el cultivar, puede provocar afectaciones significativas en las producciones agrícolas.

Aplicando otros escenarios climáticos futuros este tipo de análisis permite a la empresa arrocera estimar las variaciones y la intensidad de los impactos en la producción, añadiendo a la simulación componentes de afectos de enfermedades fitopatógenas como *Perycularia oryzae*, ayudaría a tener mejore estimación de los riesgos y sus efectos en rendimiento en el futuro. Esta es una tarea a tomar en el futuro trabajo de apoyo a la toma frente al cambio climático, para lo cual el INCA de Los Palacios tiene información sobre el patógeno que se puede utilizar para parametrizar el componente de enfermedades en BioMA.

Ejemplos de experimentos de simulación con cambios en manejo agrícola

Haciendo uso de una de las bondades de la plataforma “herramienta del agro manejo” podemos simular el riego a discreción y los resultados como era de esperar resultan superiores. Nótese en la Figura 17 como los rendimientos suben (líneas punteadas en tonalidad de azul) con respecto a los limitados por agua. Se aprecia además que los mismos en su generalidad decrecen hacia finales de siglo fundamentalmente debido al impacto que la subida de temperatura ocasiona al cultivo lo cual por otro lado acelera las fases de desarrollo como se puede observar en la Figura 18 y la Tabla 3.

Teniendo en cuenta el análisis de consenso para las 5 proyecciones encontramos que, para la ventana temporal climática centrada en 2030 y con respecto al período

de referencia como promedio la fase de emergencia se alcanza un día antes, aunque los valores extremos pudieran ser de 4 días antes y hasta 5 días después. La fase de floración se alcanza como promedio 11 días antes, y los valores extremos pudieran ser de hasta 25 días antes y 6 días después. La fase de maduración se alcanza como promedio 12 días antes, y los valores extremos pudieran ser de hasta 25 días antes y 7 días después.

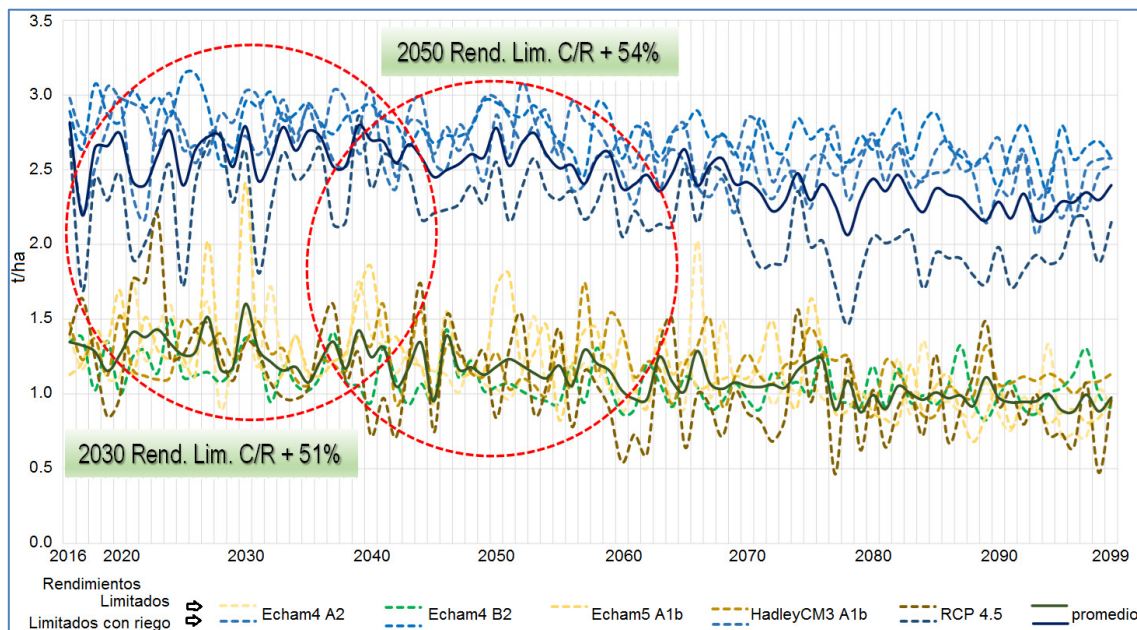


Figura 17. Resultado con modelo WARM de los rendimientos limitados y con simulación de riego en arroz (variedad J104) siembra de frío desde 2016 al 2099 y para las 5 proyecciones practicadas a los modelos Echam4 A2 y B2, Echam5 A1b, HadleyCM3 A1b y RCP 4.5, así como el promedio de estas proyecciones.

Del mismo modo para la ventana temporal climática centrada en 2050 y con respecto al período de referencia como promedio la fase de emergencia se alcanza un día antes, aunque los valores extremos pudieran ser de 4 días antes y hasta 2 días después. La fase de floración se alcanza como promedio 15 días antes, y los valores extremos pudieran ser de hasta 26 días antes y 3 días después. La fase de maduración se alcanza como promedio 17 días antes, y los valores extremos pudieran ser de hasta 27 días antes.

En la Figura 17, se observan las diferencias entre los rendimientos para cultivo de arroz (variedad J104) usando la gama completa de escenarios futuros, en los niveles de producción potencial (líneas solidas) y limitado por agua (líneas punteadas) para

esta variedad de arroz en Los Palacios. Se observa una clara tendencia decreciente en el rendimiento potencial del cultivo, pero menos pronunciada que la de la variedad INCA LP5 en la Figura 14.

En el caso de los rendimientos limitados por agua y con aplicación de riego encontramos que según el análisis de consenso para las 5 proyecciones en la ventana temporal climática centrada en 2030 y con respecto al período de referencia, como promedio los rendimientos de arroz estarán por debajo en un 54% (producción de secano - línea verde sólida en la Figura 17) y un 6% (producción con riego, línea azul sólida), mientras que para 2050 estarán por debajo en un 58% y un 8% respectivamente.

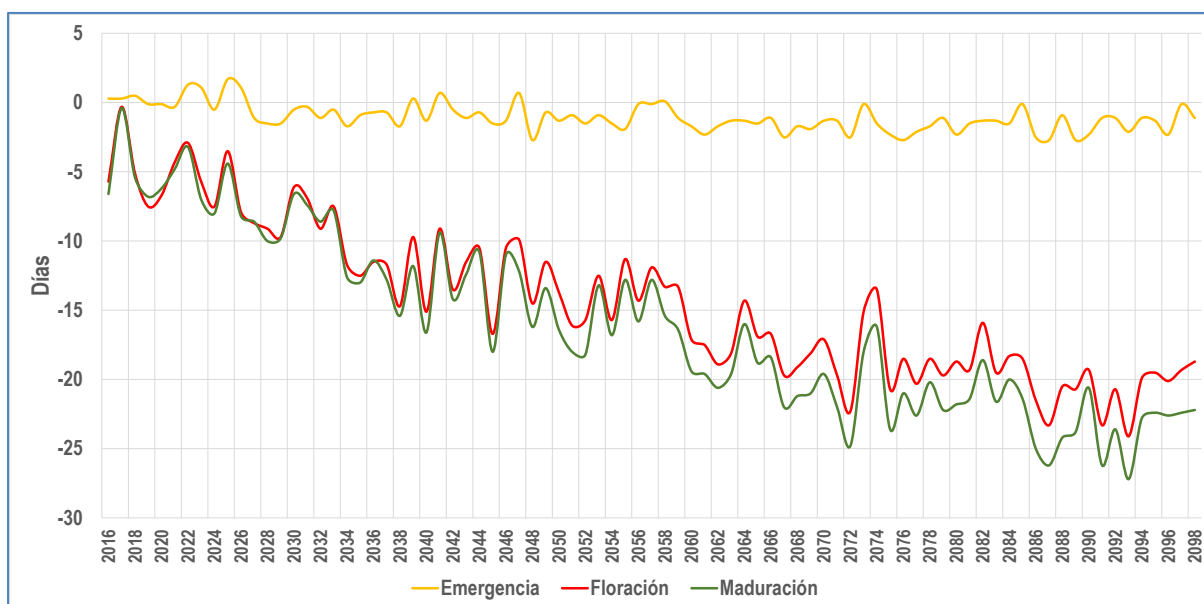


Figura 18. Comportamiento en días de arribo a las fases de emergencia, floración y madurez respecto las observadas en la actualidad teniendo en cuenta el experimento del 2004 en Los Palacios.

Tabla 3 Diferencias promedias en días de arribo a las fases de emergencia, floración y madurez respecto las observadas en la actualidad

		Siembra	Emergencia	Floración	Maduración		Siembra	Emergencia	Floración	Maduración
mínimo	W2030	0	-2	-24	-24	W2050	0	-2	-25	-29
medio	W2030	0	-1	-9	-10	W2050	0	-1	-12	-14
máximo	W2030	0	6	8	8	W2050	0	3	8	5

Similares análisis se realizaron en el caso del arroz con la variedad INCA LP5 y aunque el comportamiento en general es muy parecido, los valores de los rendimientos fueron superiores a los de la variedad J104, según se puede observar en la Figura 19. En una mirada al consenso promedio de las proyecciones podemos concluir que tanto para la ventana temporal climática centrada en 2030 y 2050, los rendimientos potenciales y limitados en la variedad INCA LP5, se obtienen un 10% por encima con respecto a la variedad J104. Tales resultados en rendimiento inferior y menos estable para la variedad J104 es conocida ya que esta es la variedad usada como base genética para mejoramiento de arroz en INCA y por tal la variedad INCA LP5 incluye mejoras genéticas con respecto a J104 que le confieren mejores rendimientos

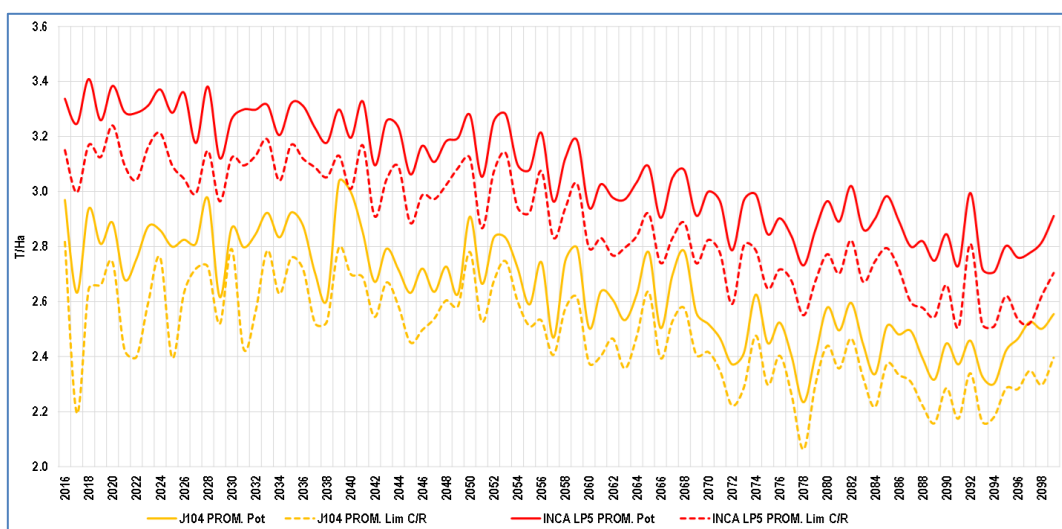


Figura 19. Resultados con modelo WARM de los rendimientos potenciales y limitados en arroz (variedad INCA LP5, siembra de frio; y variedad J104, siembra de primavera) desde 2016 a 2099 aplicando riego consenso de 5 proyecciones.

Usualmente la siembra del arroz en Cuba se realiza en invierno y verano. El impacto de las mayores temperaturas durante el verano a pesar de constar con mayor abastecimiento hídrico incide en los menores rendimientos que se obtienen respecto a la siembra de invierno. La modelación, resultado del consenso de 5 proyecciones para la variedad INCA LP5 (Figura 20), nos corrobora el hecho de que a futuro se mantiene esta tendencia. La diferencia para rendimientos potenciales en la ventana temporal climática centrada en 2030 y 2050 resulta ser de 18 y 20% respectivamente,

mientras que para los rendimientos limitados con aplicación de normas de riego son de 22 y 27% para 2030 y 2050 respectivamente.

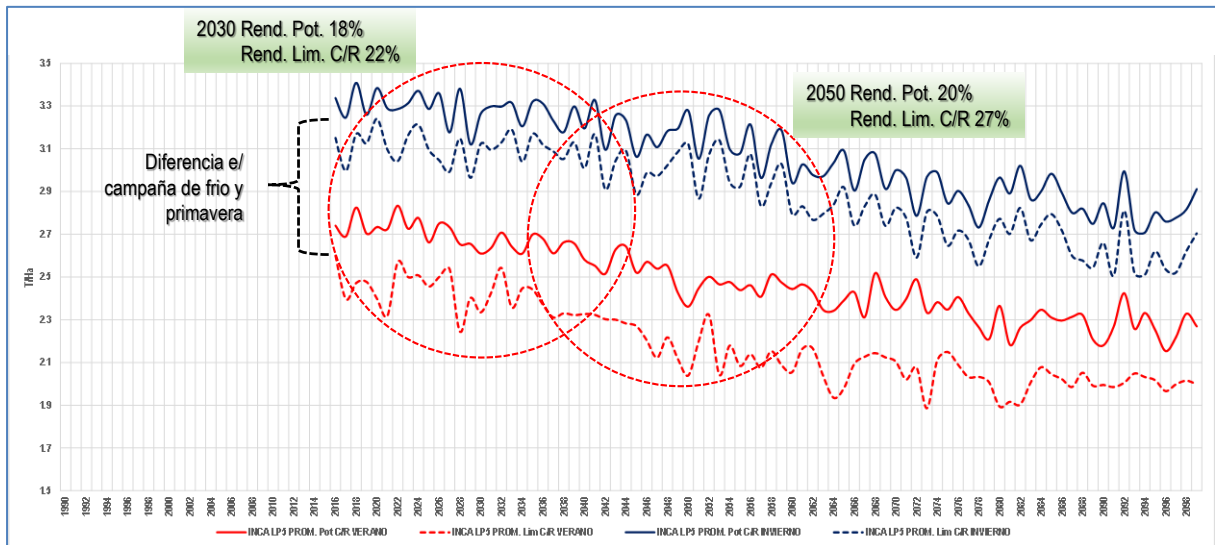


Figura 20. Resultado con modelo WARM de los rendimientos potenciales y limitados en arroz variedad INCA LP5 siembra de invierno y verano desde 2016 al 2099 consenso 5 proyecciones.

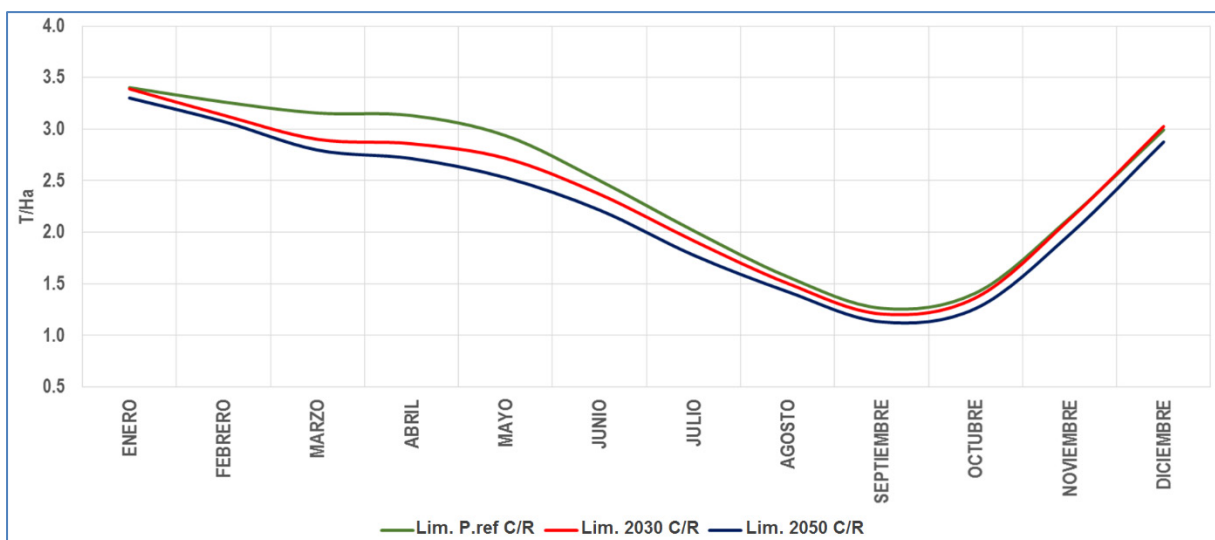


Figura 21. Modelación de rendimientos limitados siembra corrida mensual C/R Arroz INCA LP5 Echam5 A1b Los Palacios.

En aras de observar el comportamiento de los rendimientos si se realizara una siembra escalonada corrida comenzando el día 15 de cada mes, se realizó la modelación de rendimientos potenciales y limitados con aplicación de riego para la variedad de arroz INCA LP5 y para la proyección Echam5 A1b en la localidad de Los Palacios (Figura 21, Tabla 4). De acuerdo a estos resultados los mayores

rendimientos se obtendrían cuando se siembra en los meses de diciembre a marzo así como un segundo periodo de estabilidad de la producción potencial interesante al sembrar en el mes de abril-mayo.

Tabla 4. Diferencias entre las simulaciones de rendimientos limitados siembra corrida mensual para la situación actual y las proyecciones para 2030 y 2050, C/R Arroz INCA LP5 Echam5 A1b Los Palacios

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
2030	0	-4	-8	-9	-7	-5	-5	-4	-4	-3	-1	1
2050	-3	-6	-11	-13	-14	-11	-12	-9	-10	-11	-8	-4

Ejemplo de experimento de simulación con rotación arroz - sorgo

Una de las prácticas que han tenido éxito en la localidad de Los Palacios ha sido la siembra de sorgo. A partir de la parametrización con experimentos del INCA Los Palacios en la variedad “ISIAP” Dorado efectuados entre los años 2009 y 2010, se ha conformado un agro-manejo con rotación de cultivos arroz variedad INCA LP5 año 1 (modelado con WARM) y sorgo variedad “ISIAP” Dorado año 2 (modelado con CROPSYST) para la proyección Echam5 A1b (Figura 22 y 23).

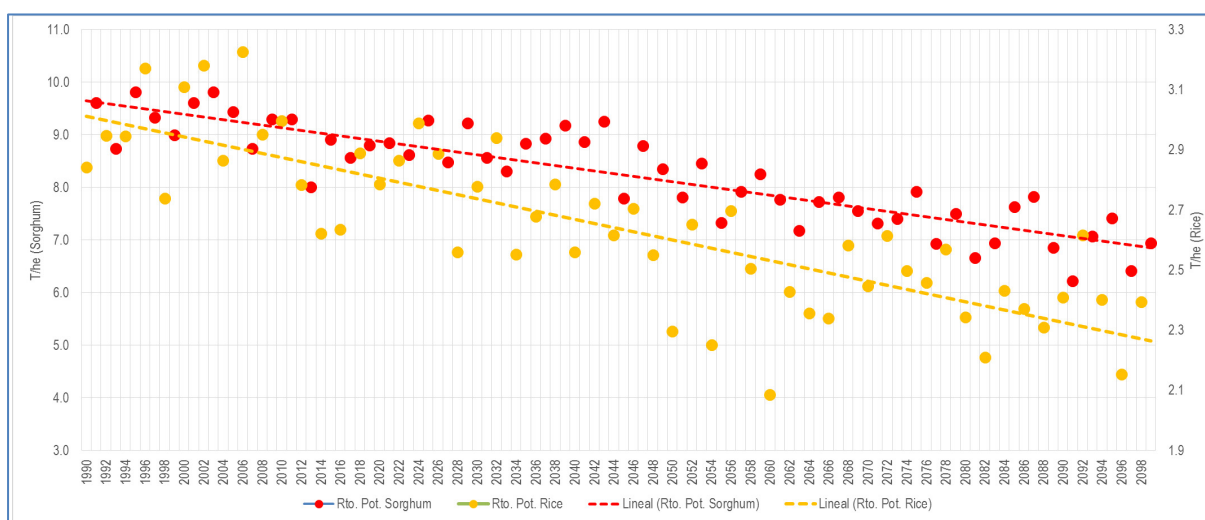


Figura 22. Rendimientos potenciales con rotación de cultivos arroz variedad INCA LP5 año 1 y sorgo variedad “ISIAP” Dorado año 2 para la proyección Echam5 A1b.

En la Figura 22 se observa la tendencia a la caída de los rendimientos potenciales, lo cual es evidente en los resultados de esta rotación.

En la Figura 23 se observa las variaciones del rendimiento potencial del sorgo y arroz con siembras en todos los meses del año. Se observa la decaída del rendimiento en ambos cultivos en la época entre agosto y septiembre. Entre los dos cultivos el arroz presenta una caída mayor del rendimiento en esta época en comparación con el sorgo. Este tipo de experimentos de simulación (que aún requieren un análisis más profundo) puede ser de gran ayuda para determinar las combinaciones óptimas de fechas de siembra para los cultivos en rotación, teniendo en cuenta la duración del ciclo de crecimiento de cada cultivo, la flexibilidad que ofrece el uso de diferentes variedades. la disponibilidad de agua para riego y factores económicos, como el precio del arroz frente al sorgo.

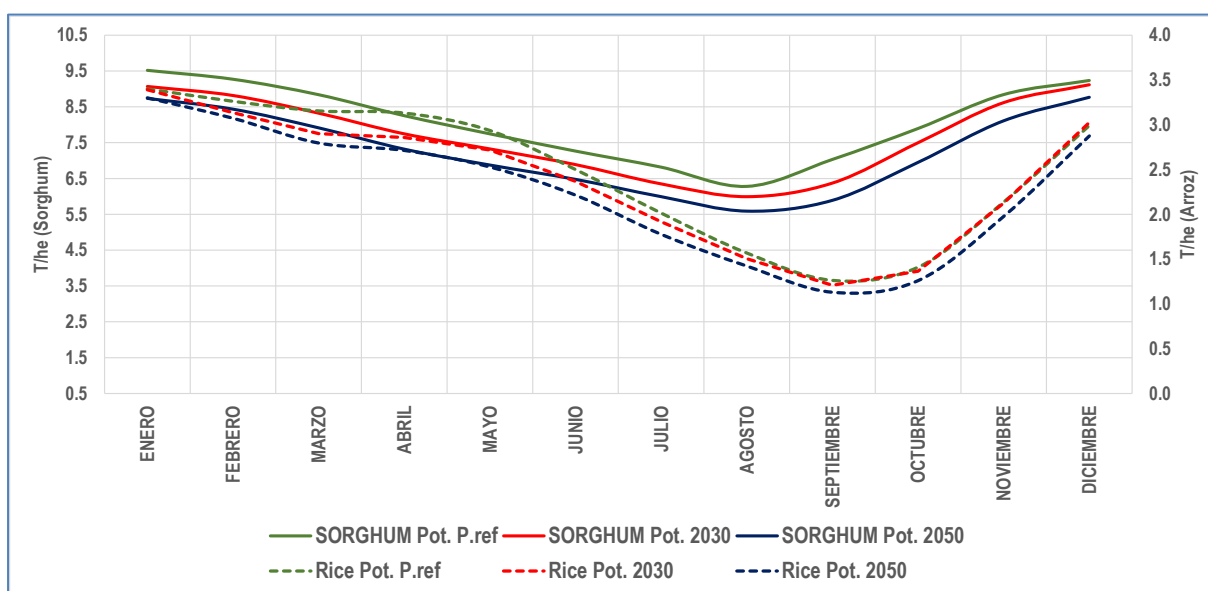


Figura 23. Rendimientos de sorgo variedad “ISIAP” Dorado (línea sólida) y con arroz variedad INCA LP5 (línea punteada) para la proyección Echam5 A1b en los periodos de referencia, 2030 y 2050.

El Maíz

La Figura 24 presenta varias simulaciones de los rendimientos modelados de maíz sembrados en enero, la parametrización se efectuó con la variedad P7928 a partir de los datos del INCA nacional. Se simulo usando la serie climática histórica de 1971 a 2013 y proyección Echam4 A2. Aquí podemos observar como a través del proceso de ajuste de parámetros se logró calibrar el modelo CropSyst. La línea punteada superior es la modelación con datos no parametrizados. Las 3 líneas solidas inferiores es el ajuste y los resultados de rendimientos potenciales, limitados por agua y con la

aplicación de riego en cuatro momentos de su desarrollo fenológico de 20 mm a 0.80 de contenido de humedad en el suelo.

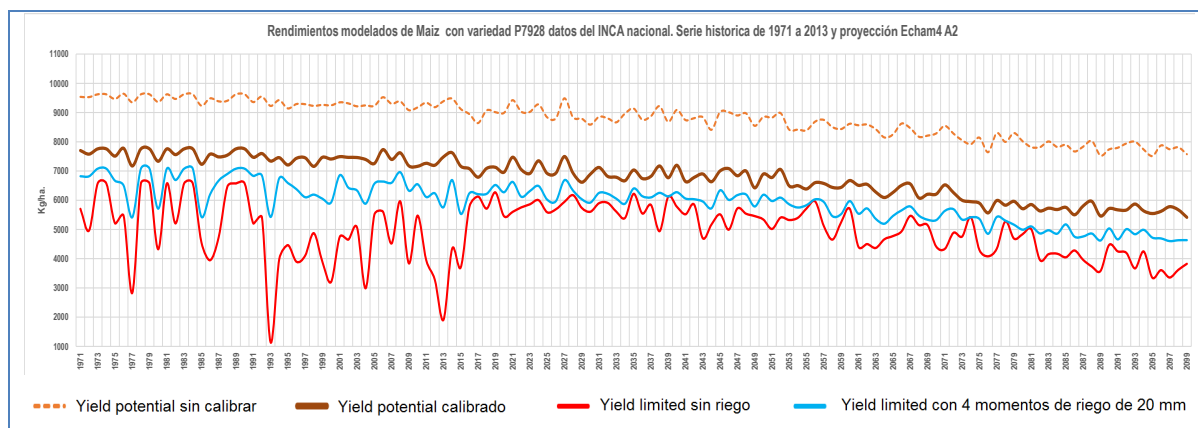


Figura 24. Comportamiento modelado del rendimiento en maíz variedad P7928 en la estación experimental del INCA nacional. Parametrización y calibración con datos experimentales del INCA nacional. Serie climatológica histórica de 1971 a 2013 y proyección Echam4 escenario A2 (2014-2099).

Es interesante observar que los rendimientos potenciales simulados con el modelo no calibrado presentan el mismo patrón temporal que aquellos con el modelo calibrado. Las diferencias absolutas entre los dos son casi constantes en el tiempo.

En el caso de las simulaciones para condiciones sin riego y con aplicación restringida de riego encontramos para esta proyección Echam4 A2 que en la ventana temporal climática centrada en 2030 y con respecto al período de referencia como promedio los rendimientos estarán por debajo en un 18% y un 12% respectivamente, mientras que para 2050 estarán por debajo en un 24% y un 15% respectivamente. Además de ser más bajos en promedio, los rendimientos sin riego también presentan una variación interanual mucho más fuerte que los resultados con aplicación restringida de riego. Además, se puede observar una mayor variación inter anual en los resultados simulados para condiciones de producción en secano durante el periodo de referencia (1971-2013) y el escenario futuro (Echam-4, SRES A2), lo cual se atribuye a la limitada capacidad de los modelos climáticos en predecir la ocurrencia de extremos climáticos.

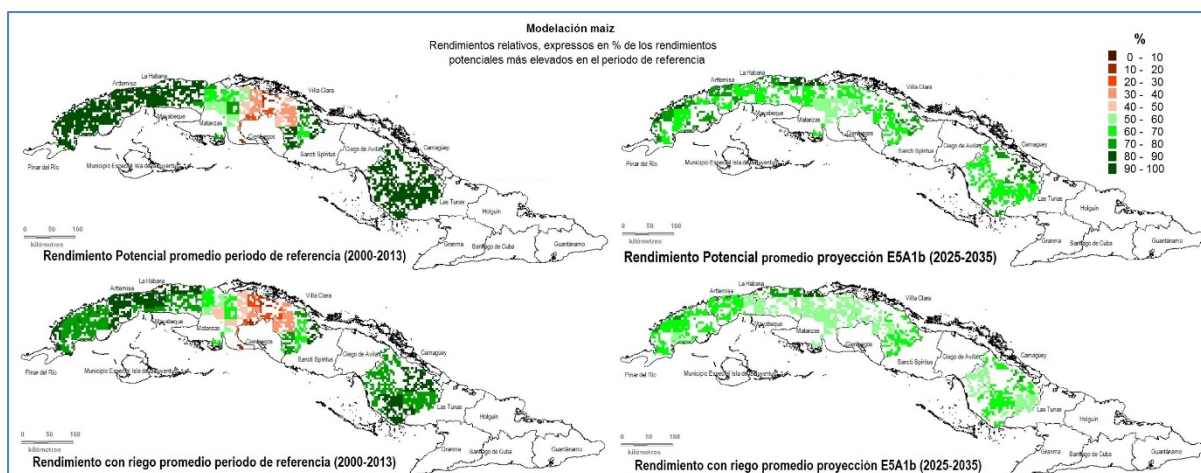


Figura 25. Mapeo de rendimientos potenciales y limitados con riego en maíz modelado para climatología histórica y la proyección con modelo Echam5 escenario A1b.

En la Figura 25 se puede apreciar la diferenciación espacial de los resultados simulados según el escenario Echam5 A1b con relación al periodo de referencia actual. En promedio, los resultados en el entorno del 2030 son menores en el territorio nacional, sin embargo, los cambios de rendimiento en las agrupaciones provinciales son variados, en algunas disminuyen y en otras aumentan los rendimientos con relación al periodo de referencia (2000-2013).

Por ejemplo, la relación entre los rendimientos potenciales simulados con respecto al periodo de referencia a nivel provincial se muestra de la siguiente forma: Pinar del Río -18%, Artemisa -23%, La Habana -16%, Mayabeque -18%, Matanzas +12%, Villa Clara +19%, Cienfuegos +29%, Sancti Spíritus -20%, Camagüey -23%, Las Tunas -20% y Ciego de Ávila -26%.

Además, se observa los cambios en los rendimientos limitados por agua empleando la herramienta para modelar aplicación restringida de riego, la comparación de resultados con respecto a la actualidad a nivel provincial resulta ser de la siguiente forma: Pinar del Río -19%, Artemisa -23%, La Habana -24%, Mayabeque -19%, Matanzas +10%, Villa Clara +18%, Cienfuegos +31%, Sancti Spíritus -20%, Camagüey -23%, Las Tunas -22% y Ciego de Ávila -24%.

De este ejemplo, aprendemos que los impactos del cambio climático pueden ser sustancialmente diferentes en diferentes partes del país, lo que también implica diferentes necesidades de adaptación.

Comparando la aplicación de las normas de riego en ambos casos, vemos como para el arroz se logran disminuir los impactos en mayor proporción que el caso del maíz para lo cual habría que modelar otras normas o momentos para tratar de disminuir el impacto. Sin embargo, hay que reconocer que para cualquier cultivo la investigación con modelación biofísica sobre medidas de adaptación con uso de irrigación se ven limitadas por la deficiencia de los modelos climáticos en predecir condiciones extremas en los escenarios futuros (i.e. años muy secos). Por tal razón, la capacidad de los modelos de cultivos que dependen de los resultados de modelos de clima para sus datos de entrada en estimar más necesidades de riego a futuro es limitada.

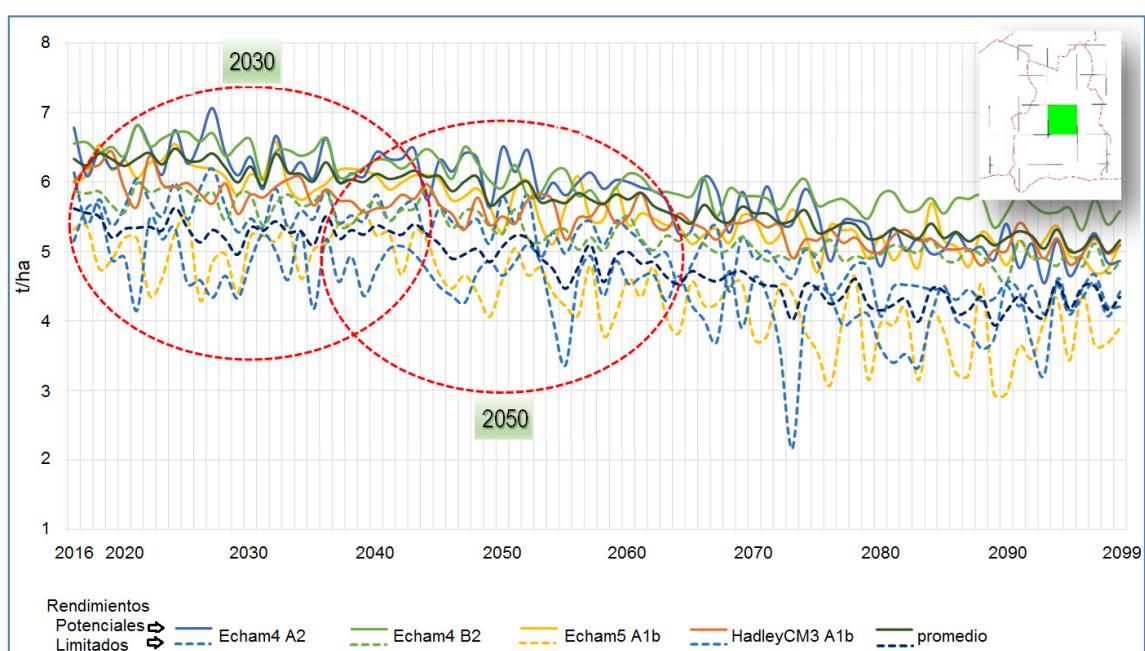


Figura 26. Comportamiento modelado del rendimiento potencial y limitado por agua en maíz variedad P7928 en una cuadrícula central de la municipalidad de Güira de Melena. Parametrización y calibración con datos experimentales del INCA nacional. Consenso de 4 proyecciones (Echam5 A1b, Echam4 A2, Echam4 B2 y HadleyCM3 A1b).

El resultado que se presenta en la Figura 26, fue trabajado sin modelar el riego debido a que el maíz es uno de los cultivos que se permite obtener rendimientos aceptables en condiciones de secano, además de que la fecha de siembra escogida resulta dentro del período lluvioso en la región estudiada. Se advierte a modo general que en la ventana temporal climática centrada en 2030 y 2050 los rendimientos potenciales promedios son de 6,2 y 5,9 t/ha respectivamente, mientras que los limitados por agua están en el orden 5,3 y 5,0 t/ha para 2030 y 2050 respectivamente.

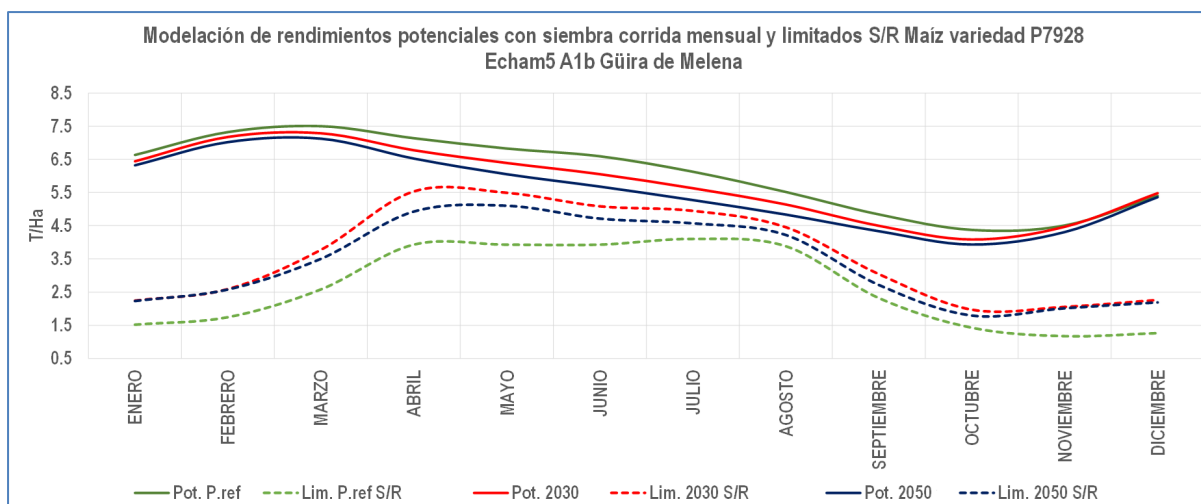


Figura 27. Modelación de rendimientos potenciales y limitados por agua, siembra corrida mensual, maíz Echam5 A1b Güira de Melena en los periodos de referencia y escenario centrado en 2030 y 2050.

Al igual que para el caso arroz en aras de observar el comportamiento de los rendimientos si se realizara una siembra escalonada corrida comenzando el día 15 de cada mes, se realizó la modelación de rendimientos potenciales y limitados sin aplicación de riego para maíz y para la proyección Echam5 A1b en la localidad de Güira de Melena (Figura 27). De acuerdo a estos resultados los mayores rendimientos potenciales se obtendrían cuando se siembra en los meses de enero a marzo y diciembre, no obstante los rendimientos limitados por agua en esta decaen mucho, por lo que habría la necesidad de aplicar riego. Como era de esperar durante el período lluvioso del año los rendimientos limitados por agua ascienden y casi se equiparan a los potenciales que disminuyen durante los meses de mayo-agosto con respecto al resto del año.

El Sorgo

En la Figura 28 podemos apreciar otro ejemplo, la modelación usando CropSyst realizada en sorgo para proyección Echam5 A1b, en este caso se trabajó en la parametrización con experimentos del INCA Los Palacios en la variedad "ISIAP" Dorado. Resulta interesante ver como también los rendimientos van decayendo hacia finales del siglo. La tendencia negativa con un avance anual de 58 kg/ha en la ventana climática temporal de 2050 para los rendimientos potenciales, mientras que para los rendimientos limitados por agua en la ventana climática temporal de 2070 la tendencia

es negativa pero menos significativa con un avance anual menor de 24 kg/ha en reducción del rendimiento.

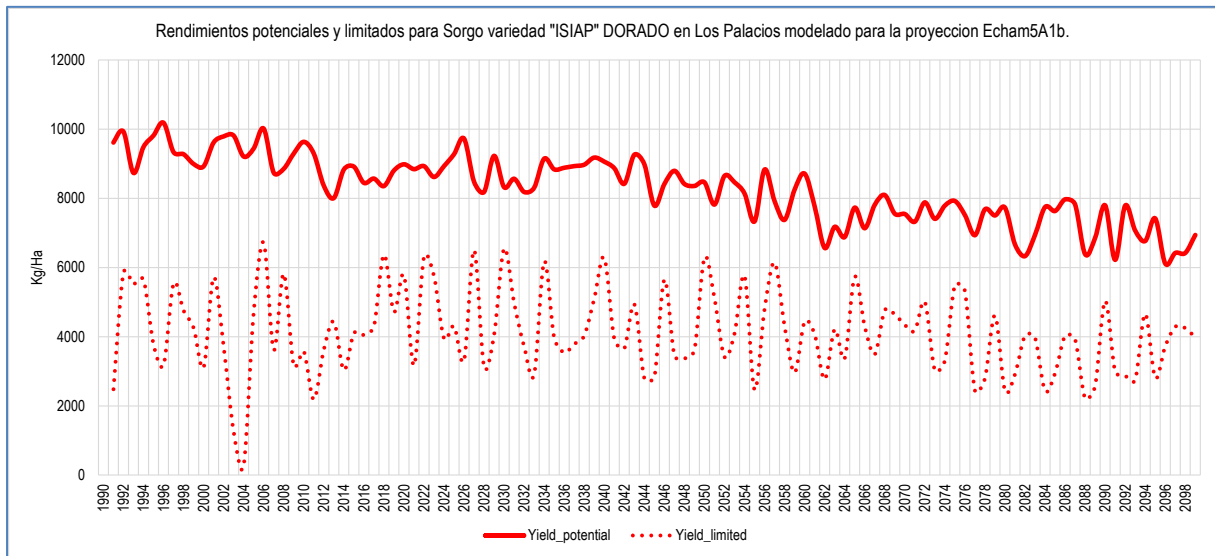


Figura 28. Rendimientos potenciales y limitados por agua de Sorgho variedad "ISIAP" DORADO en Los Palacios modelado para la proyección Echam5A1b.

6. Consideraciones finales

Logros

En nuestro modo de ver, la transferencia y aplicación de esta herramienta no se debe ver como un proceso que culmina, muy por el contrario, ha quedado establecida para comenzar a explotar, difundir y actualizar tantas veces como sea posible ya que su concepción de origen así lo ha tenido en cuenta.

Este informe documenta cómo se implementó el sistema; ilustra la cantidad de trabajo involucrado y las diferentes habilidades que se necesitan; y proporciona algunos buenos ejemplos de su utilidad una vez implementado, cómo puede usarse y con qué propósito. En este sentido, también puede servir de inspiración para otras organizaciones que desean implementar un sistema similar.

Sin embargo, para un soporte de políticas sólido, se necesita más trabajo, especialmente para mejorar la parametrización y realizar más pruebas de validación, y luego aplicarla a las preguntas de políticas reales.

Hoy disponemos de:

- Infraestructura instalada. (Hardware y Software)
- Equipo técnico multidisciplinario capacitado
- Propiciado y generado un intercambio interinstitucional con entidades científicas y de producción (INSMET-INCA-IAgric-IS)
- Bases de datos de alto nivel y escala adecuada integrada al Sistema
- Datos de clima: (serie histórica de referencia, más de 12 proyecciones a largo plazo generadas con modelos climáticos regionales.
- Datos de suelos: variables físicas de suelos para cuadrículas con resolución de 4 km de lado del 50% del país
- Datos y parámetros de cultivos: Varios cultivos parametrizados y calibrados, al menos una primera aproximación (arroz dos variedades, maíz y sorgo)
- Manejo: Integrada al Sistema un calendario de manejo agrícola ya empleado en BASAL por la RIAP
- Mascaras de cultivos a partir de la cartografía del uso de suelo
- Primera apropiación de la herramienta a escala local en Los Palacios

- Reconocida la labor y el esfuerzo empleado por los desarrolladores en aras de una exitosa transferencia y el intercambio con los especialistas nacionales

Diseminación

En los últimos años del proyecto (2017/2018) y en la medida que se alcanzaron resultados, estos han sido difundidos en diversos foros científicos nacionales e internacionales tales como:

- Participación en la Mesa Redonda: Agro-climatología y el Cambio Climático. XI Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo 2017. Aquí se presentó parte de los resultados en la modelación de los impactos en el cultivo de arroz en la municipalidad de Los Palacios.
- Participación en “Taller Regional de Cierre Componente 3 del Programa EUROCLIMA (Ecuador): Agricultura Sostenible, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático en América Latina”. 2017. Se participó en la Conferencia en Modelación de Cultivos para Evaluación de Impactos del Cambio Climático en la Agricultura de Latinoamérica y el Caribe LAC. Se dictó la conferencia “Trabajando con el Modelo WARM... caso de análisis Arroz en Cuba”.
- Participación en el Taller “La modelación de los impactos del cambio climático en el sector agropecuario y medidas de adaptación. La experiencia del proyecto BASAL”. Actividad de intercambio entre el proyecto BASAL y el Programa Conjunto “Suma tu gota: fortalecimiento de la resiliencia de familias y grupos vulnerables afectados por la sequía en Santiago de Cuba”. Se dictaron dos conferencias: “La modelación climática como herramienta para la adaptación al cambio climático: “definiciones básicas y antecedentes en Cuba” y “Resultados en el marco de BASAL y perspectivas”.
- Participación en el IX CONGRESO CUBANO DE METEOROLOGÍA. XVII CONGRESO LATINOAMERICANO E IBÉRICO DE SOCIEDADES DE METEOROLOGÍA. Mesa Redonda: Información agrometeorológica y agroclimatológica para BASAL. Se presentaron parte de los resultados en la modelación biofísica de cultivos y sus impactos a futuro para municipalidades BASAL.
- Participación en el Taller global 7, del proyecto AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project), 24-26 de abril 2018, San José,

Costa Rica, con presentación de poster: Assimilation of BioMA as a tool for climate change impact studies on agricultural crops in Cuba Environmental Bases for Local Food Sustainability Project (BASAL).

Próximos pasos

Al día de hoy mucho queda en el tintero, sin embargo la plataforma está ahí a disposición de la comunidad científica cubana especializada en temas de medio ambiente y agricultura.

Los próximos pasos previstos incluyen más pruebas y calibración de los modelos para los cultivos considerados hasta ahora (arroz, maíz, sorgo), así como la inclusión de otros cultivos. Por ejemplo, actualmente se trabaja en la adecuación de una plantilla de parámetros de cultivo para pastos “miscanthus” con vistas a lograr una parametrización ajustada a datos de Cuba y poder modelar para Jimaguayú. De igual forma se espera trabajar en la adecuación de una plantilla de frijol, para la simulación. “CANEGRO” (Singels et al., 2013) es un modelo integrado a BioMA (Stella et al., 2015) diseñado especialmente para la modelación de la caña de azúcar. Esperamos que podamos poner a punto de conjunto con los investigadores de la caña este interesante e importante modulo.

Esto requerirá intensificar y consolidar la colaboración entre los institutos involucrados hasta ahora y expandir esta comunidad para otros institutos e investigadores como los de la caña de azúcar. Los contactos con el JRC también se espera que continúen. Por ejemplo, el JRC recientemente adoptó una versión mejorada del modelo WARM (para arroz) que puede transferirse fácilmente al sistema instalado en Cuba.

El compromiso continuo con la comunidad internacional de modelación agrícola, en particular AgMIP-LAC, también se considera de suma importancia para acelerar el desarrollo de nuevas aplicaciones específicas para la región y para expandir las bases de recursos humanos capacitadas en esta área de investigación que es aún muy frágil.

Futuras aplicaciones relevantes para la política podrían incluir, por ejemplo, un análisis más profundo de los impactos del cambio climático en Cuba y de las opciones de adaptación; y ahora que se abre un nuevo espacio de investigación con la III Comunicación Nacional de Cuba a la CMNUCC, quizás pueda sumarse a los

anteriores contribuyentes que han venido trabajando en la generación del conocimiento sobre los impactos de los cambios climáticos en el sector agrario.

“La tierra no es como muchos piensan, una herencia de nuestros padres. Es cuando menos, un préstamo de nuestros hijos”.

«Martí, José: Obras Completas. Ed. de Ciencias Sociales. La Habana. 27T»

“El año es el que aporta frutos y no el campo”.

«Teofrasto, discípulo de Aristóteles»

“Lo necesario y útil que es la predicción del tiempo lo sabe más el agricultor, quien durante la siembra y la recolección necesita buen tiempo y durante el crecimiento, lluvia cálida”.

«Lomonosov»

7. Referencias

- Confalonieri, R., Bellocchi, G., Tarantola, S., Acutis, M., Donatelli, M., and Genovese, G. (2010). Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: Exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters. *Environmental Modelling & Software* 25, 479-488.
- Confalonieri, R., Rosenmund, A. S., and Baruth, B. (2009). An improved model to simulate rice yield. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 463-474.
- Donatelli M., G. Russell, A.E Rizzoli, et al. 2010 A component-based framework for simulating agricultural production and externalities. In: *Environmental and agricultural modelling: Integrated approaches for policy impact assessment*, F.Brouwer and M. van Ittersum editors, Springer, 63-108
- Ferrari G, Fumagalli D, Rodriguez Baide J. Introducción a BioMA - Tutorial Creación de una solución de modelado. European Commission; 2015. JRC99796
- Ferrari G, Fumagalli D, Rodriguez Baide J. Introducción a BioMA - Tutorial Creación de componentes. European Commission; 2015. JRC99795
- Ferrari G, Rodriguez Baide J, Fumagalli D. GDD -Presentador Gráfico de Datos - Manual de usuario. European Commission; 2015. JRC99849
- Fumagalli, D., and G.Ferrari, 2016. BioMA Framework User Guide. http://bioma.jrc.ec.europa.eu/documentation/BioMA_Framework_User_Guide.pdf
- Rodriguez Baide J, Ferrari G, Fumagalli D. BioMA Spatial - Version BASAL - Guía de Usuario. European Commission; 2015. JRC99846
- Rodriguez Baide J, Fumagalli D, Van Den Berg M, Ferrari G, Zucchini A. Constructing a context specific BioMA Spatial platform for Cuba: Software improvements done under BASAL project during phases one and two. European Commission; 2015. JRC99975

- Singels, A., Jones, M., and van den Berg, M. (2008). "DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module: Part 1. Scientific documentation." International Consortium for Sugarcane Modelling (ICSM), Mount Edecombe.
- Singels, A., Jones, M., Marin, F., Ruane, A. C., and Thorburn, P. (2013). Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South-Africa using the Canegro model. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol 28, 14 pp.
- Stella, T., Francone, C., Yamaç, S. S., Ceotto, E., Pagani, V., Pilu, R., and Confalonieri, R. (2015). Reimplementation and reuse of the Canegro model: From sugarcane to giant reed. Computers and Electronics in Agriculture 113, 193-202.
- Stella, T., Francone, C., Yamaç, S. S., Ceotto, E., Pagani, V., Pilu, R., and Confalonieri, R. (2015). Reimplementation and reuse of the Canegro model: From sugarcane to giant reed. Computers and Electronics in Agriculture 113, 193-202.
- Supit, I., Hooijer, A.A. and Diepen van, C.A., 1994. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956 EN, Joint Research Center, Commission of the European Communities, Luxembourg. Actualizaciones están disponibles en: <http://supit.net/>
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy 18 (in press).
- Vázquez Montenegro, R., Van Den Berg, M., Chang, D., Rodriguez Baide, J., Fumagalli, D., Zucchini, A., Manqueira, L., Soto, F., Florido, R. and Hernández, N., Assimilation of BioMA as a tool for climate change impact studies on agricultural crops in Cuba - Environmental Bases for Local Food Sustainability Project (BASAL), Presented in: 7th AgMIP Global Workshop, 2018, JRC111764.

Lista de figuras

Figura 1. Componentes de la Plataforma BioMA.	6
Figura 2. Resultados de salidas de la Plataforma BioMA en el contexto europeo, una vez establecidos los datos, los criterios etc. Entre ellos tenemos gráficos de: Índice de área foliar, biomasa aérea, variables agroclimáticas (evapotranspiración de referencia), contenido de agua en el suelo, temperatura del suelo, estadísticas climáticas para un punto etc.	7
Figura 3. Datos regionalizados generados por la primera fase del proyecto EUROCLIMA para América Latina y el Caribe (climáticos, propiedades hidráulicas del suelo y presencia de cultivos,) a partir de los cuales se realizó la primera contextualización en la transferencia de BioMA para Cuba.	8
Figura 4. Modelación de maíz para toda Cuba usando una platilla de cultivo para América Latina. La gráfica representa rendimientos potenciales y limitados por agua detalle de una cuadrícula espacial en el centro de Matanzas.	9
Figura 5. Centro de datos (DC) con el que BioMA para BASAL funciona. Es un conjunto de servidores que trabajan de forma sincronizada y conectados a un servidor de almacenamiento masivo donde se encuentran todos los datos necesarios para la realización de las tareas, por lo que la respuesta es obtenida de forma más eficiente y rápida.	10
Figura 6. Resumen gráfico de toda la información recopilada con la cual se ha alimentado la base de datos del sistema de simulación con BioMA. Fuente: INSMET, Evento de socialización de resultados del componente de modelación biofísica de BASAL, diciembre 2017.	11
Figura 7. Trabajo entre investigadores agrícolas, agro meteorólogos y cibernéticos en función de la parametrización y calibración de cultivos en condiciones biofísicas de Cuba para su uso en BioMA.	12
Figura 8. Variación porcentual anual respecto al período de referencia (1983-2013), y los valores mínimos, medios y máximos de los períodos climáticos proyectados al 2020, 2025 y 2030 para cada variable procesada: temperatura máxima (Tx), temperatura media (Tm), temperatura mínima (Tn), humedad relativa (HR), precipitación (Pr), evapotranspiración de referencia (ETo) y velocidad del viento (Vt), a base de las salidas de 12 proyecciones ejecutadas con el Modelo Climático Regional (MCR) PRECIS.	13
Figura 9. Resultados de una corrida en una cuadrícula para diferentes variables meteorológicas en períodos anual, lluvioso y poco lluvioso desde 1961 al 2099 y para las 12 proyecciones practicadas, así como la marcha interanual promedio para períodos climáticos promedios futuros entre 2014-2099.	14
Figura 10. Temperatura media anual promedio del consenso de 12 proyecciones para las tres municipalidades BASAL. En la tabla la diferencia promedio porcentual y su equivalente en valor de unidad respecto al período de referencia (1983-2013) en períodos climáticos futuros.	15

Figura 11. Mapeo en el ambiente BioMA de variables climáticas. La rejilla climática representa 25 km de lado y los años entre el 2025 y el 2030 es construcción del modelo Echam5 A1b.....	17
Figura 12. Esquema conceptual del Modelo Agronómico sobre el cual trabajan todos los modelos de cultivos de BioMA.	18
Figura 13. Mapas generados por BioMA como resultado de las corridas con el modelo WARM usando la parametrización para la variedad de arroz INCA J104, simulado en rejilla de 4x4 Km con el escenario climático del modelo Echam5 para el escenario de emisiones A1b en los periodos 2000-2013 y 2025-2035.	19
Figura 14. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos potenciales y limitados en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frio desde 2016 al 2099 y para las 5 proyecciones climáticas de modelos Echam4 A2 y B2, Echam5 A1b, HadleyCM3 A1b y RCP 4.5, así como el promedio de estas.	20
Figura 15. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos potenciales en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frio y primavera desde 1991 al 2015 aplicando las series de datos climáticos históricos de los Palacios.....	21
Figura 16. Resultados del modelo WARM referentes a los rendimientos limitados con simulación de riego restringido en arroz (variedad INCA LP5) siembra de frio y primavera desde 2011 al 2024 aplicando las series de datos climáticos históricos y un escenario climático en comparación a rendimiento observado y planificado.....	22
Figura 17. Resultado con modelo WARM de los rendimientos limitados y con simulación de riego en arroz (variedad J104) siembra de frío desde 2016 al 2099 y para las 5 proyecciones practicadas a los modelos Echam4 A2 y B2, Echam5 A1b, HadleyCM3 A1b y RCP 4.5, así como el promedio de estas proyecciones.	24
Figura 18. Comportamiento en días de arribo a las fases de emergencia, floración y madurez respecto las observadas en la actualidad teniendo en cuenta el experimento del 2004 en Los Palacios.	25
Figura 19. Resultados con modelo WARM de los rendimientos potenciales y limitados en arroz (variedad INCA LP5, siembra de frio; y variedad J104, siembra de primavera) desde 2016 a 2099 aplicando riego consenso de 5 proyecciones.	26
Figura 20. Resultado con modelo WARM de los rendimientos potenciales y limitados en arroz variedad INCA LP5 siembra de invierno y verano desde 2016 al 2099 consenso 5 proyecciones.	27
Figura 21. Modelación de rendimientos limitados siembra corrida mensual C/R Arroz INCA LP5 Echam5 A1b Los Palacios.	27
Figura 22. Rendimientos potenciales con rotación de cultivos arroz variedad INCA LP5 año 1 y sorgo variedad "ISIAP" Dorado año 2 para la proyección Echam5 A1b.	28

Figura 23. Rendimientos de sorgo variedad "ISIAP" Dorado (línea solida) y con arroz variedad INCA LP5 (línea punteada) para la proyección Echam5 A1b en los periodos de referencia, 2030 y 2050.....	29
Figura 24. Comportamiento modelado del rendimiento en maíz variedad P7928 en la estación experimental del INCA nacional. Parametrización y calibración con datos experimentales del INCA nacional. Serie climatológica histórica de 1971 a 2013 y proyección Echam4 escenario A2 (2014-2099).	30
Figura 25. Mapeo de rendimientos potenciales y limitados con riego en maíz modelado para climatología histórica y la proyección con modelo Echam5 escenario A1b.	31
Figura 26. Comportamiento modelado del rendimiento potencial y limitado por agua en maíz variedad P7928 en una cuadrícula central de la municipalidad de Güira de Melena. Parametrización y calibración con datos experimentales del INCA nacional. Consenso de 4 proyecciones (Echam5 A1b, Echam4 A2, Echam4 B2 y HadleyCM3 A1b).....	32
Figura 27. Modelación de rendimientos potenciales y limitados por agua, siembra corrida mensual, maíz Echam5 A1b Güira de Melena en los periodos de referencia y escenario centrado en 2030 y 2050.	33
Figura 28. Rendimientos potenciales y limitados por agua de Sorgo variedad "ISIAP" DORADO en Los Palacios modelado para la proyección Echam5A1b.	34

Lista de tablas

Tabla 1. Proyecciones de inicio, fin y duración promedios de períodos vegetativos, húmedos y secos para diferentes períodos climáticos futuros. Ejemplo para el municipio de Güira de Melena. Análisis de consenso entre proyecciones y comportamiento respecto al período de referencia.	16
Tabla 2. Promedio de las diferencias entre los rendimientos calculados con el modelo WARM para las proyecciones y para la referencia actual.	20
Tabla 3 Diferencias promedias en días de arribo a las fases de emergencia, floración y madurez respecto las observadas en la actualidad	25
Tabla 4. Diferencias entre las simulaciones de rendimientos limitados siembra corrida mensual para la situación actual y las proyecciones para 2030 y 2050, C/R Arroz INCA LP5 Echam5 A1b Los Palacios	28

PONERSE EN CONTACTO CON LA UNIÓN EUROPEA

En persona

En la Unión Europea existen cientos de centros de información Europe Direct. Puede encontrar la dirección del centro más cercano en: https://europa.eu/european-union/contact_es

Por teléfono o por correo electrónico

Europe Direct es un servicio que responde a sus preguntas sobre la Unión Europea. Puede acceder a este servicio:

- marcando el número de teléfono gratuito: 00 800 6 7 8 9 10 11 (algunos operadores pueden cobrar por las llamadas);
- marcando el siguiente número de teléfono: +32 22999696; o
- por correo electrónico: https://europa.eu/european-union/contact_es

BUSCAR INFORMACIÓN SOBRE LA UNIÓN EUROPEA

En línea

Puede encontrar información sobre la Unión Europea en todas las lenguas oficiales de la Unión en el sitio web Europa: <https://europa.eu>

Publicaciones de la Unión Europea

Puede descargar o solicitar publicaciones gratuitas y de pago de la Unión Europea en:

<https://publications.europa.eu/es/publications>

Si desea obtener varios ejemplares de las publicaciones gratuitas, póngase en contacto con Europe Direct o su centro

JRC Declaración de objetivos

La misión del Centro Común de Investigación, como servicio de ciencia y conocimiento de la Comisión Europea, es apoyar las políticas de la UE con argumentos independientes durante todo el ciclo de las mismas.



EU Science Hub
ec.europa.eu/jrc



@EU_ScienceHub



EU Science Hub - Joint Research Centre



Joint Research Centre



EU Science Hub



Publications Office

doi:10.2760/306030

ISBN 978-92-79-88850-2