

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/361924859>

# Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático

Chapter · July 2021

CITATIONS

0

2 authors:



**Gabriel Origel**

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

23 PUBLICATIONS 52 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Vicente Torres**

Academia Nacional de Investigacion Y Desarrollo

51 PUBLICATIONS 402 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



GEOTERMIA EN MEXICO Y AMERICA LATINA [View project](#)



Mountain ecosystems in Mexico: ecosystem services and climate change [View project](#)

# **Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos**

Julio Cesar Morales Hernández  
Enrique González Sosa  
Carlos Manuel Welsh Rodríguez  
Oscar Frausto Martínez





CONACYT  
Registro Nacional de Instituciones  
y Empresas Científicas y Tecnológicas  
Registro: 1900555

## Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

© Julio Cesar Morales Hernández  
© Enrique González Sosa  
© Carlos Manuel Welsh Rodríguez  
© Oscar Frausto Martínez

### Dirección del Proyecto

Eduardo Licea Sánchez  
Esther Castillo Aguilar  
José Eduardo Salinas de la Luz

### Arte

Paulina Cordero Mote  
Vanesa Alejandra Vázquez Fuentes  
Livia Rocco Sarmina

### Formación de Interiores

Paulina Cordero Mote

1a. edición

© 2021 Fernando de Haro y Omar Fuentes

ISBN 978-607-437-561-9

D.R. © CLAVE Editorial

Paseo de Tamarindos 400 B, Suite 109.

Col. Bosques de las Lomas, Ciudad de México, México. C.P. 05120

Tel. 52 (55) 5258 0279/80/81

ame@ameditores.mx

ecastillo@ameditores.mx

www.ameditores.com

Las opiniones y puntos de vista expresados en la presente obra, son responsabilidad única y exclusiva de su autor y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la editorial, y las de sus integrantes.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, archivada o transmitida en forma alguna o mediante cualquier sistema, ya sea electrónico, mecánico o de fotorreproducción, sin la previa autorización de los editores.

Elaborado en México.

## Capítulo VIII

# Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático

*Gabriel Origel-Gutiérrez<sup>1</sup>, Oscar Sánchez-Martínez<sup>1</sup>, Oscar Rojas<sup>1</sup>,  
Vicente Torres-Rodríguez<sup>2</sup>, Guillermo Montilla-León<sup>2</sup>,  
Julio N. Martínez-Sánchez<sup>2</sup>, Miguel Blancas-Reza<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), dirección electrónica: gabriel.origel@gmail.com

<sup>2</sup> Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C.

### Resumen

La agricultura es vulnerable a los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático por ser dependiente de condiciones atmosféricas, situación que origina afectaciones que pueden amenazar la seguridad alimentaria. Los desastres asociados a eventos hidrometeorológicos extremos pueden afectar los cultivos, reducir la producción agrícola, dañar infraestructuras agroalimentarias, así como afectar bienes e insumos agrícolas. Por lo anterior, y como estrategia para mitigar tales impactos, se promueve el uso de información agroclimática oportuna a través de la vigilancia de cultivos, acción clave para mantener la producción agrícola, ya que permite detectar déficits a corto plazo y coadyuva en el desarrollo rural a largo plazo. Para la vigilancia se utilizan programas de cómputo habilitados en Sistemas de Alerta Temprana Agroalimentarios (SATA). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) desarrolló la “Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático (IXIM)”, un programa computacional para analizar cultivos en riesgo asociado a huracanes, inundaciones, heladas, granizadas y ondas de calor. Esta plataforma fue transferida a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en México para proceder a su implementación operativa. El objetivo de este capítulo es difundir la estructura y operación de IXIM para promover su uso, retroalimentación y posibles mejoras. Entre las principales ventajas de IXIM están: contar con un potente y muy rápido módulo de interpolación de datos de estaciones meteorológicas que funciona con una malla de referencia e incluye técnicas basadas en una co-variable asistente predictora; calcular en forma automática el balance hídrico del suelo agrícola propuesto por la FAO; producir datos

compatibles con Sistemas de Información Geográfica (SIG); generar pronósticos meteorológicos por asimilación de datos; detectar en automático eventos extremos y áreas de afectación por análisis multirriesgo en zonas agrícolas; contar con bases de datos agroclimáticas: valores umbrales críticos por cultivo y etapa de desarrollo, fenología, coeficientes de cultivo, así como cartografía nacional de cultivos básicos (maíz, frijol, trigo y sorgo). Como resultado, IXIM realiza la detección temprana de áreas agrícolas con riesgo de afectación según su sensibilidad y etapa de desarrollo. Finalmente, y debido a que IXIM exporta estadísticas, mapas y variables ráster, se espera que contribuya también al análisis meteorológico convencional en otras aplicaciones.

## Introducción

Las afectaciones en el sector agrícola por desastres asociados a eventos hidrometeorológicos extremos pueden llegar a representar un riesgo para la seguridad alimentaria. Las sequías, ondas de calor, inundaciones, huracanes, heladas y granizadas pueden disminuir significativamente la disponibilidad de alimentos al destruir la producción del sector primario, dañar las infraestructuras para el procesamiento de los alimentos, afectar los bienes e insumos requeridos y la capacidad productiva de los agricultores. Como consecuencia, se provoca inestabilidad en los precios de los alimentos, se desestabilizan los mercados, se origina un entorno que afecta a los sistemas de comercialización agrícola, así como al suministro y consumo de alimentos. De igual forma, los eventos hidrometeorológicos extremos reducen los ingresos y obligan a los agricultores a emplear sus ahorros deteriorando los medios de vida, situación que se refleja en una mayor vulnerabilidad para diversas comunidades.

Asimismo, las pautas estacionales de la producción agrícola se relacionan con el ciclo biológico de cada cultivo, por lo que depende de factores climáticos y de las características físicas del medio ambiente como temperatura, exposición a horas luz y disponibilidad de agua para las plantas. Esta complejidad, junto con los desafíos añadidos por el crecimiento de la población, la degradación del medio ambiente y el cambio climático, aumentan las necesidades de información agroclimática en forma oportuna (Rembold *et al.*, 2019). Por esta razón, la vigilancia agrícola y el seguimiento de los cultivos constituyen acciones clave para la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Se estima que, en más de cien países, estas actividades se realizan a través de los SATA (Fritz *et al.*, 2019), ya que la vigilancia agrícola permite detectar los déficits a corto plazo en la producción de cultivos asociados con la variabilidad del clima, pero también facilita el desarrollo rural a largo plazo, especialmente en zonas afectadas por alto riesgo de inseguridad alimentaria (Rembold *et al.*, 2019).

Como estrategia global, en 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en el marco de la Agenda 2030 estableció los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS), que constituyen las líneas de acción para acabar con la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo (ONU, 2020).

El segundo objetivo ODS, denominado “Hambre cero” implica una modificación profunda en el sistema agroalimentario mundial que permita alimentar a más de 820 millones de personas que padecen hambre y a la población creciente. Adicionalmente, el décimo tercer objetivo ODS “Acción por el clima” busca abordar la emergencia climática, a través de un conjunto de medidas que permitan salvar vidas y medios de subsistencia. Entre sus metas principales se encuentra el fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

Este contexto orienta a la FAO, como organización de la ONU, a hacer frente a la problemática y alinearse a los ODS. Por ello, realiza un seguimiento de la evolución de eventos hidrometeorológicos extremos y facilita alerta temprana, así como advertencias sobre sus posibles impactos en la agricultura y la seguridad alimentaria. Como antecedentes, la FAO ha colaborado con modelos de cultivos, herramientas de cómputo y algoritmos, destacan entre estos los siguientes:

- Sistema del Índice de Estrés Agrícola (ASIS), programa computacional dedicado al monitoreo del estrés y la sequía agrícolas a partir de imágenes satelitales a nivel global (FAO, 2016; Van Hoolst *et al.*, 2016) y con versión especial para ciertos países como México, en los que se ha mejorado la cartografía de los cultivos y la información fenológica.
- AgroMetShell (AMS), programa informático elaborado para la previsión del rendimiento de los cultivos (Hoefsloot, 2006).
- Algoritmo *Satellite Enhanced Data Interpolation* (SEDI), el cual realiza interpolación asistida a partir de la alta correlación de una variable ráster conocida, con otra de menor cantidad, de datos medidos para mejorar la distribución espacial de los datos estimados (Hoefsloot, s/f).
- Sistema de Modelos para evaluar los Impactos Agrícolas ante el Cambio Climático (MOSAICC), sistema de modelización basado en la web que permite evaluar los efectos del cambio climático, integrar la información científica en el diseño de los proyectos de desarrollo agrícola y adoptar decisiones económicas, así como elaborar políticas públicas (FAO, 2015).

El desarrollo de la “Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM” constituye un producto realizado en el marco del proyecto UTF/MEX/142, titulado: “Información Agro-climatológica y Certificación de Almacenamiento”, firmado por la FAO y el gobierno de México a través de la SADER. Entre los

propósitos de este proyecto se incluye acompañamiento técnico y transferencia geo-tecnológica para el monitoreo agroclimático, en particular para la implementación de un SATA a través de herramientas computacionales que coadyuven en la toma de decisiones en materia de seguridad alimentaria.

Para la programación de IXIM, la FAO definió las especificaciones técnicas y convocó a una licitación, en la que resultó favorecida la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANIDE), asociación civil de investigación científica aplicada que cuenta con certificación ISO 9001:2008 y está incluida en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIE-CyT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Durante el desarrollo computacional se acordó utilizar para la nueva Plataforma de Análisis de Multirriesgo Agro-Climático el término *IXIM*, que significa maíz en diferentes lenguas del sureste de México, entre ellas chontal, tojolabal, tzotzil, lacandón y maya. Lo anterior, con el propósito de destacar la diversidad genética del principal cultivo de México, así como para honrar la interculturalidad vinculada a las actividades agrícolas.

## Objetivo

Difundir la estructura y operación preliminar de la Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM para promover su uso, retroalimentación y posibles mejoras, principalmente en la implementación de un SATA, así como para extender su funcionalidad y aplicaciones en próximas versiones.

## Modelo hídrico aplicado

El desarrollo computacional de IXIM se basa en el modelo de la FAO de balance hídrico de suelos para cultivos específicos (CSWB, por sus siglas en inglés), también llamado WABAL (Frere y Popov, 1986) o modelo hídrico de la FAO, el cual es balance hídrico entre el suelo, el agua y los requisitos de la planta, que es utilizado para evaluar el impacto de las condiciones climáticas en los cultivos (Rojas, *et al.*, 2005). Los resultados del modelo hídrico de la FAO se producen cada 10 días, por lo que cubren las diversas etapas de desarrollo de los cultivos y permiten el cálculo de variables, tales como exceso de agua en el suelo, evapotranspiración real y déficit de agua durante las fases fenológicas del cultivo (desarrollo, floración y maduración).

Este modelo es específico para cada cultivo y permite producir variables de mayor relevancia, entre ellas el Índice de Satisfacción de Requerimiento de Agua (WRSI) en el momento del seguimiento y al final del período vegetativo, y la

Evapotranspiración real (ETa). Además, se desempeña especialmente bien en áreas donde el agua es el principal factor limitante en el desarrollo de los cultivos.

Como entrada requiere datos meteorológicos en tiempo *cuasi* real, en especial de la precipitación y de la Evapotranspiración Potencial (PET), obtenidos de estaciones meteorológicas con información disponible no mayor de 10 días de retraso.

La ecuación de balance hídrico para la vegetación es:

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_a - (r+i)$$

Donde:  $W_t$  es la cantidad de agua almacenada en el suelo en el momento  $t$ ;  $W_{t-1}$  es la cantidad de agua almacenada en el suelo al final del período anterior ( $t-1$ );  $R$  es la precipitación acumulada durante la decena o el período  $t$ ;  $ET_a$  es la evapotranspiración real en el tiempo del período  $t$ ;  $r$  representa las pérdidas de agua debidas a la escorrentía en el tiempo del período  $t$ ;  $i$  representa las pérdidas de agua debidas a la percolación profunda en el tiempo del período  $t$  (Rojas, *et al.*, 2005).

De la ecuación de balance anterior se derivan dos parámetros importantes relacionados con el crecimiento de los cultivos: la  $ET_a$ , ya descrita, y el Índice de Satisfacción de Requerimiento de Agua (WRSI). La  $ET_a$  tiene que ver fundamentalmente con la energía radiativa solar que influye de forma significativa en el rendimiento de los cultivos. Por su parte, el WRSI se utiliza para evaluar la cantidad de agua recibida por el cultivo durante cualquier momento de la temporada. Habitualmente el WRSI es utilizado para definir el rendimiento de un cultivo de manera cualitativa; es decir, asignando las categorías: bueno, medio y pobre, o en cifras relativas (por ciento de un valor óptimo). Cuando el WRSI es igual a 100, indica que no hay estrés hídrico y que la cosecha es buena, mientras que un valor de WRSI de 50 corresponde a un estrés hídrico de agua severo que provoca un rendimiento deficiente de las cosechas. La estimación de la evapotranspiración real ( $ET_a$ ) se realiza de acuerdo con el cálculo aplicado en el programa Agromet-Shell (Hoefsloot, 2006).

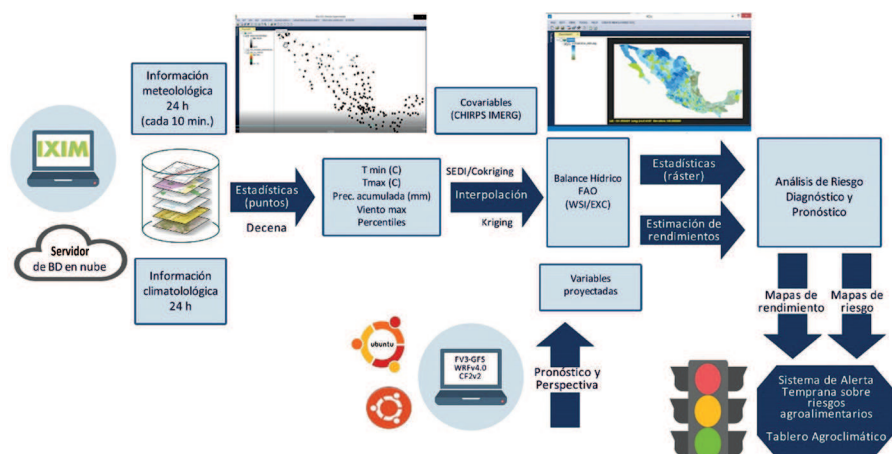
IXIM incluye un modelo para estimar la evapotranspiración de referencia en diferentes resoluciones temporales, siguiendo las pautas sobre la evapotranspiración de cultivos (Allen *et al.*, 1998).

El balance hídrico de la FAO proporciona un indicador de "alerta temprana" de gran utilidad ante la reducción del rendimiento debido al estrés hídrico. Adicionalmente, IXIM evalúa otras variables climáticas durante el tiempo específico del ciclo de cultivo, las cuales podrían afectar el rendimiento y la producción.

## Arquitectura computacional y componentes

IXIM es una aplicación computacional, la cual permite analizar datos meteorológicos nacionales que se almacenan en la nube. De igual forma, requiere de un módulo de pronóstico y perspectiva climáticos que se instala en Linux (Ubuntu) (figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo simplificado de la arquitectura computacional del programa IXIM con énfasis en su funcionalidad



Fuente: Origel-Gutiérrez, 2020.

## Usuarios y personal

IXIM tiene como usuarios principales a técnicos en agrometeorología, agricultura, y meteorología, que a la vez son proveedores de información agroclimática y de mercados agroalimentarios, así como el personal que colabora en el entorno de un SATA. Otros usuarios potenciales son funcionarios, organismos internacionales y agencias de ayuda humanitaria. El perfil profesional comprende especialistas en Ciencias Atmosféricas, Ciencias de la Tierra, Agronomía, Geografía, Sistemas Computacionales, Informática y computación, Ingeniería y Economía agrícola, entre otras disciplinas.

## Hardware

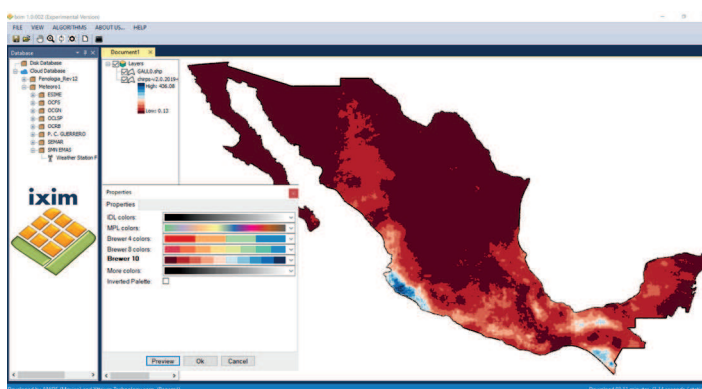
IXIM está programado como sistema para computadoras con *Windows* 10. La capacidad de procesamiento depende del tamaño del país o región. Se recomienda

su instalación en equipos con una configuración mínima de un procesador Intel i7, 16 GB de RAM y 2 TB en disco duro. Es preferible contar con un disco de estado sólido para el arranque. De igual forma, se recomienda una tarjeta de video tipo NVIDIA de 2 GB o superior. También se debe considerar que IXIM requiere conexión a internet de banda ancha para comunicarse con el servidor de bases de datos, que residirá en servicios en la nube o en la red de la institución.

## Software

IXIM se desarrolló en C++ y C#, además utiliza librerías como GDAL para su instalación en equipos con sistema operativo *Windows 10*, tiene una interfaz gráfica amigable con diferentes secciones para la interacción, procesamiento y visualización (figura 2).

Figura 2. Interfaz gráfica y logotipo de la Plataforma Multirriesgo Agroclimático IXIM



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, IXIM requiere de un módulo de pronóstico meteorológico, el cual se instala en Linux (Ubuntu), así como de un servidor de bases de datos en la nube, el cual compila y procesa los datos de las estaciones meteorológicas. Tanto el servidor de bases de datos, como el módulo de pronóstico climático pueden residir en el mismo equipo y contratarse con algún proveedor de servicios en la nube.

## Datos espaciales

IXIM simplifica la complejidad del territorio y sus datos (agrícolas, geográficos y meteorológicos) en un modelo espacial ráster, una estructura matricial a la que se

asocia un valor para cada celda, el cual puede ser continuo o discreto, de acuerdo con el tipo de variable. Se utilizan archivos binarios IMG acompañados con archivos ASCII (HDR), que corresponden a los encabezados utilizados en el sistema ENVI. La base de datos requerida se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrada para IXIM\*

| Clave               | Dato                                                           | Descripción                                                                                                                                                                       | Fuente        | Formato                             |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| MCG                 | Estaciones meteorológicas automáticas                          | Base de datos con las variables medidas.                                                                                                                                          | PAIS          | XLS                                 |
| GMX                 | Malla nacional (~1 km²)                                        | Polígonos de celdas regulares equidistantes a 0.0089285714 grados (~1 km) en coordenadas geográficas. Uso: estandarizar todos los archivos para referirlos a esta malla nacional. | FAO           | SHP                                 |
| COU/<br>STA/<br>MUN | Límites administrativos: país, estados, municipios             | Polígonos vectoriales y máscara ráster de límites: país, estados y municipios.                                                                                                    | PAIS          | SHP e IMG+HDR                       |
| MSK                 | Máscaras ráster para cada cultivo y para cada campaña agrícola | Máscaras ráster de cobertura por cultivo y ciclo. El umbral mínimo de superficie por pixel es de 10% del pixel con cobertura agrícola.                                            | PAIS          | IMG+ HDR a partir polígono ESRI SHP |
| WHC                 | Capacidad de almacenamiento de agua**                          | Ráster de valores de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para disponibilidad de las plantas.                                                                          | PAIS / GLOBAL | GeoTIFF / IMG + HDR                 |
| MAC                 | Fenología Calendario agrícola municipal por ciclo              | Tabla con las fechas de siembra y cosecha por cultivo desagregadas a nivel municipal para cada cultivo.                                                                           | PAIS          | CSV                                 |
| THR                 | Valores umbrales por fenología del cultivo                     | Tabla con valores umbrales de acuerdo con la fenología de cada cultivo, información que puede editarse y adaptarse por el usuario.                                                | FAO / PAIS    | CSV                                 |

\*Fuente: elaboración propia a partir de Origel-Gutiérrez 2020. / \*\* Se recomienda generar esta capa de información por medio de una metodología basada en datos de textura de perfiles de suelos (Torres y Montilla, 2020; Klocke y Hergert, 1990).

## Normas geoespaciales

IXIM es una herramienta de la FAO, por lo que se espera implementarla en diversos países, trabaja a partir de una base de datos espaciales ráster con coordenadas geográficas y *datum* WGS84. La resolución espacial es 0.0089 grados decimales, distancia que es variable en función de la latitud y fue establecida para ser consistente con la resolución y malla de datos del sistema ASIS (FAO, 2016; Van Hoolst, 2016), plataforma ya implementada en los SATA de varios países, por lo que ambos son complementarios.

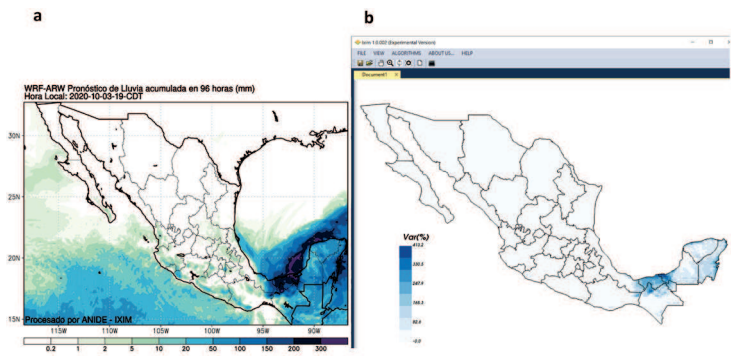
## Funcionalidad

La versión 1 de IXIM tiene las siguientes funciones: importación de datos de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) en el formato XLS, o equivalente, con misma estructura para su integración en una base de datos instalada en servicios en nube; lectura directa de variables asistentes en formato ráster (IMG+hdr y GeoTIFF); integración de tablas de fenología (CVS); exportación de estadísticas (CVS); interpolación a una malla ráster de referencia por algoritmos kriging, cokriging y SEDI (Hoefsloot, 2016); cálculo de la correlación estadística entre la variable a estimar y la predictora; enmascaramiento automático de la interpolación según las máscaras de cultivos por ciclo agrícola; cálculo ráster del modelo de balance hídrico de la FAO (Popov y Frere, 1986; Rojas *et al.*, 2005), análisis de multirriesgo hidrometeorológico por eventos extremos; edición de valores umbrales de riesgo para las diferentes variables; pronóstico y perspectiva meteorológica; exportación de reportes en tablas CSV por unidad administrativa; elaboración de mapas; así como exportación de variables ráster (GEOTIFF).

La generación de pronósticos a corto plazo se realiza en un módulo específico en Ubuntu, el cual se ejecuta automáticamente en lenguaje *Bourne-again shell* (*bash*). Este análisis permite evaluar el riesgo por ocurrencia de eventos hidrometeorológicos a 24, 48, 72 y 96 horas, por cultivo y etapas fenológicas. Este pronóstico se obtiene a partir de modelos numéricos del tiempo meteorológico, los datos de entrada se generan en el sistema FV3-GFS (<https://www.gfdl.noaa.gov/fv3/>), un modelo que ofrece salidas de pronóstico a nivel global con resolución espacial de 27.5 km y periodicidad de hasta cuatro veces al día. Posteriormente, se ejecuta un *downscaling* con el modelo WRFV4.0 para obtener archivos de 16 km de resolución, los cuales son remuestreados con GDAL por el método del vecino más cercano a 1 km para ser compatibles con la malla de referencia nacional. En la configuración de IXIM el análisis concatenado de pronóstico a corto plazo se realiza automáticamente a las 00:00 y 12:00 horas zulú. Las varia-

bles utilizadas son precipitación acumulada (figuras 3 y 4), temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio a 2 metros, velocidad y dirección del viento (10 m), así como nieve y hielo.

Figura 3. Salida cartográfica del módulo de pronóstico del tiempo (a) y visualización en la interfaz de IXIM (b). Ambas imágenes muestran el pronóstico a 96 horas de la precipitación en mm. El análisis fue realizado el 30 de septiembre de 2020, adelantando información meteorológica sobre las altas precipitaciones presentadas el 3 de octubre en Tabasco y Chiapas



Fuente: elaboración propia con datos procesados por ANIDE.

Figura 4. Nota periodística de alerta sobre inundaciones en Tabasco y Chiapas, asociadas a lluvias del frente frío 4, la tormenta tropical “Gamma” y el desfogue de Presa Peñitas en el alto Grijalva, situación que provoca afectaciones en rancherías, zonas pobladas y campos de cultivo



Fuente: INFOBAE (www.infobae.com).

Por otra parte, la perspectiva climática (subestacional) en IXIM corresponde a períodos de decenas para 10, 20 y 30 días. El modelo CFSv2 (*Climate Forecast System V2*) se utiliza para obtener estas perspectivas para las variables consideradas en el algoritmo de multi-riesgo. Este modelo cuenta con datos disponibles a nivel global con una ventana temporal de hasta cuatro semanas.

## Consideraciones finales y trabajo futuro

La plataforma IXIM se conceptualizó para contribuir al análisis de multirriesgo para la producción agrícola, al modelar y detectar, de manera temprana, áreas de cultivo con potencial de afectación por eventos hidrometeorológicos extremos. Por lo anterior, IXIM puede contribuir también en la toma de decisiones sobre seguridad alimentaria, en la planificación del mercado y en las actividades de comercialización, así como en aspectos relacionados con el almacenamiento de granos básicos.

La novedad principal de IXIM es su versatilidad en la integración de diversas herramientas en un sólo sistema que comprende el ingreso de los datos de estaciones meteorológicas, su interpolación posterior, el cálculo del balance hídrico de la FAO, la lectura y escritura datos compatibles con diversos sistemas como los SIG; la generación de pronósticos meteorológicos; el análisis multirriesgo en zonas agrícolas, así como la generación de mapas de riesgo de afectación por cultivo y tipo de evento.

Como trabajo futuro para próximas versiones se propone integrar más herramientas dentro de IXIM. En particular para las siguientes funciones:

- Integración de un módulo para definir o cambiar fácilmente el área de estudio y adaptarlo a cualquier territorio
- Ingreso sistematizado de bases de datos históricas sobre estaciones automáticas
- Control de calidad para la depuración de datos
- Análisis retrospectivo para la detección de eventos extremos conocidos
- Compatibilidad con diversas redes de estaciones automáticas
- Integración de diversas estaciones por variable para incrementar el volumen de datos de entrada y mejorar la calidad de interpolación
- Módulo que facilite la integración de diferentes cultivos
- Visualización de atributos de archivos vector
- Interpolación con algoritmos que integren inteligencia artificial que permita mejor ajuste y menor error
- Análisis de datos meteorológicos alternos como variables de entrada, por ejemplo, imágenes derivadas de sensores remotos o de modelos geofísicos que resuelvan ecuaciones complejas, por asimilación de datos a mayor resolución u otros métodos, que permitan funcionar como estaciones virtuales.

- Integración del módulo *Phytosanitary Risk* que incorpore el modelamiento del riesgo de enfermedades y plagas.

## Agradecimientos

El patrocinio para el desarrollo de IXIM se realizó en el marco del proyecto UTF/MEX/142 FAO-SADER, se agradece a ambas instituciones el apoyo, financiamiento y facilidades brindadas, así como la autorización para publicar este texto, particularmente a la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA) y al Centro de Información de Mercados Agroalimentarios (CIMA) (<https://www.cima.aserca.gob.mx>). Asimismo, el acceso de los datos de las estaciones meteorológicas automáticas fue proveído por el Servicio Meteorológico Nacional; la información geográfica y edafológica fue proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; mientras que la información cartográfica de superficie cultivada fue facilitada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Finalmente, la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos y el CONACYT apoyaron la edición de este capítulo y la presentación de IXIM en el marco de la Octava Reunión Nacional de REDESClim 2020.

## Referencias bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-*FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300 (9), D05109.
- FAO (2015). *MOSAICC: A modelling system for the assessment of agricultural impacts of climate change*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO (2016). *Protocolo para el Proceso de Calibración y Adaptación Nacional de la Herramienta ASIS-País*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (SLM/NRC), Panamá.
- Frere, M., & Popov, G. (1986). *Early agrometeorological crop yield assessment*. *FAO plant production and protection paper*, 73, 144. FAO.
- Fritz, S., See, L., Bayas, J. C. L., Waldner, F., Jacques, D., Becker-Reshef, I., ... & Rembold, F. (2019). A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps. *Agricultural systems*, 168, 258-272.
- Hoefsloot, P. (2006). *AgrometShell CM box user guide*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / The European Union / Southern African Development Community. ([http://www.hoefsloot.com/wiki/index.php?title=Main\\_Page](http://www.hoefsloot.com/wiki/index.php?title=Main_Page))
- Hoefsloot, P. (s/f). *The SEDI interpolation method*. Disponible en: <http://docplayer.net/32291116-The-sedi-interpolation-method-how-does-it-work.html>
- Klocke, N. L., y Hergert, G. W. (1990). G90-964 How Soil Holds Water. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*, 725.
- ONU. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Origel-Gutiérrez, 2020. *Nota técnica: Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. México (Informe interno inédito).
- Rembold, F., Meroni, M., Urbano, F., Csak, G., Kerdiles, H., Perez-Hoyos, A., ... & Negre, T. (2019). ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis. *Agricultural systems*, 168, 247-257.
- Rojas, O., Rembold, F., Royer, A., & Negre, T. (2005). Real-time agrometeorological crop yield monitoring in Eastern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. 25 (1), pp.63-77. hal-00886252
- Torres-Rodríguez, V. y Montilla-León, G. (2020). *Plataforma de Análisis Climático Multirriesgo en México: Plataforma IXIM (Informe final)*. Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. / Food and Agriculture Organization of the United Nations. México.

Van Hoolst, R., Eerens, H., Haesen, D., Royer, A., Bydekerke, L., Rojas, O., ... & Racionzer, P. (2016). FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 37(2), 418-439.