

Generación y evaluación estadística del pronóstico de lluvia a cinco días

Arturo Corrales Suastegui, Luis Antonio González Jasso, Mario Primitivo Narváz Mendoza, Miguel Angel González González, Esteban Salvador Osuna Ceja, Osías Ruíz Álvarez y Luis Humberto Maciel Pérez



SAGARPA
SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN



inirap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centro de Investigación Regional Norte Centro
Campo Experimental Pabellón
Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Noviembre 2013
Folleto Técnico Núm. 53, ISBN: 978-607-37-0227-0

**SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN**

Lic. Enrique Martínez y Martínez
Secretario

Lic. Jesús Aguilar Padilla
Subsecretario de Agricultura

Prof. Arturo Osornio Sánchez
Subsecretario de Desarrollo Rural

Lic. Ricardo Aguilar Castillo
Subsecretario de Alimentación y Competitividad

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES,
AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Pedro Brajcich Gallegos

Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M. C. Arturo Cruz Vázquez
Coordinador de Planeación y Desarrollo

Lic. Luis Carlos Gutiérrez Jaime
Coordinador de Administración y Sistemas

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL
NORTE CENTRO**

Dr. Homero Salinas González

Director Regional

Dr. Uriel Figueroa Viramontes
Director de Investigación

Dr. José Verástegui Chávez
Director de Planeación y Desarrollo

Lic. Daniel Santillán Aguilar
Director de Administración y Sistemas

Dr. Alfonso Peña Ramos
Director de Coordinación y Vinculación en el estado de Aguascalientes

Generación y evaluación estadística del pronóstico de lluvia a cinco días

M.C. Arturo CORRALES SUASTEGUI*
I.S.C. Luis Antonio GONZÁLEZ JASSO*
L.I. Mario Primitivo NARVÁEZ MENDOZA*
M.C. Miguel Angel GONZÁLEZ GONZÁLEZ*
Dr. Esteban Salvador OSUNA CEJA*
M.C. Osías RUÍZ ÁLVAREZ*
M.C. Luis Humberto MACIEL PÉREZ*

*Investigadores del Campo Experimental Pabellón

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Centro de Investigación Regional Norte Centro
Campo Experimental Pabellón.
Km 32.5 carretera Ags-Zac, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
Noviembre, 2013

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán, C. P. 04010 México D. F. Teléfono (55) 3871-8700

Generación y evaluación estadística del pronóstico de lluvia a cinco días

ISBN: 978-607-37-0227-0

Primera Edición 2013

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la Institución.

La cita sugerida para esta obra es:

Corrales-Suastegui, A.; González-Jasso, L.A.; Narváez-Mendoza, M.P., González-González, M.A.; Osuna-Ceja, E.S.; Ruíz-Álvarez, O. y Maciel-Pérez, L.H. 2013. Generación y evaluación estadística del pronóstico de lluvia a cinco días. Folleto Técnico No. 53. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Pabellón. Pabellón de Arteaga, Ags. México. 23p.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MODELO METEOROLÓGICO DE MESOESCALA	2
3. MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)	4
3.1. Ecuaciones gobernantes	6
3.1.1. Coordenada vertical y variables	6
3.1.2. Ecuaciones	7
3.2. Física del modelo	8
3.2.1. Microfísica	9
3.2.2. Parametrización de cumulus	9
3.2.3. Capa límite planetaria	9
3.2.4. Modelo de superficie terrestre	9
3.2.5. Radiación	9
3.2.5.1. Radiación de onda larga	10
3.2.5.2. Radiación de onda corta	10
3.3. Componentes del sistema de modelado WRF	10
3.3.1. WPS (WRF Preprocessing System)	11
3.3.2. WRF-DA	11
3.3.3. ARW (Advanced Research WRF)	11
3.4. Configuración del WRF	11
4. GENERACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA A CINCO DÍAS	12
4.1. Acceso a la información	13
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA A CINCO DÍAS	17
5.1. Selección de puntos a evaluar	17
5.2. Análisis estadístico	17
6. CONCLUSIONES	19
7. LITERATURA CITADA	21

1. INTRODUCCIÓN

Es evidente la vulnerabilidad de México a los riesgos hidrometeorológicos como: huracanes, inundaciones, sequía, heladas, granizo, lluvia de alta intensidad y otros riesgos asociados a su presencia, como desprendimientos de tierra y afectaciones a los cultivos. Así mismo, los impactos recurrentes de estos eventos han tenido efectos negativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad de todo el país (Prieto *et al.*, 2010).

Aunque la contribución de la agricultura al Producto Interno Bruto (PIB) se ha reducido durante los últimos años, debido a los impactos de sequía e inundaciones impredecibles, este sector es el que da empleo a la mayor parte de la población rural y, como tal, juega un papel decisivo en los medios de vida del país. La extrema vulnerabilidad del sector agrícola a la variedad de riesgos/desastres ha concentrado los esfuerzos en la gestión del pronóstico meteorológico en el sector agroalimentario de México. Durante los últimos dos años, el Gobierno Federal, ha apoyado al INIFAP a través del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos para realizar pronósticos meteorológicos a corto plazo mediante el uso del modelo de predicción numérica del tiempo *Weather Research and Forecasting* (WRF, por sus siglas en inglés) con el propósito de apoyar la demanda de información de pronósticos del tiempo de las regiones agrícolas del país y mitigar los impactos de estos eventos.

El uso de modelos de predicción numérica del tiempo, constituye una herramienta tecnológica complementaria a la interpretación de observaciones convencionales que puede añadir un valor agregado al

proceso de pronóstico. La mayor resolución espacial y temporal de los datos del modelo permite a un meteorólogo observar con mayor detalle la evolución de un fenómeno meteorológico y puede proporcionar un marco más detallado en el cual las observaciones reales pueden ser interpretadas (Litta *et al.*, 2012a).

Actualmente, instituciones de Estados Unidos y Europa han implementado el sistema WRF, principalmente para la protección contra desastres naturales; en México, la CONAGUA, la UNAM y la Universidad de Guadalajara hacen uso de este sistema (Ramírez y Cuevas, 2012) y en cuyos resultados se reconoce la importancia y las ventajas de su aplicación para pronóstico meteorológico.

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente publicación es mostrar la descripción y aplicación del sistema WRF para pronóstico de lluvias a corto plazo (5 días) con el fin de contribuir a la reducción de riesgo de desastres del sector agrícola a nivel nacional.

2. MODELO METEOROLÓGICO DE MESOESCALA

Un modelo de mesoescala es un modelo de predicción numérica del tiempo cuya resolución horizontal y vertical permite pronosticar fenómenos meteorológicos a nivel regional. Dichos fenómenos, que a menudo son producto del forzamiento de la topografía o de los litorales, o bien, están relacionados con la convección, presentan algunos de los mayores retos al realizar el pronóstico. Los fenómenos meteorológicos severos, incluidos los tornados y los sistemas convectivos de mesoescala, ocurren principalmente a nivel regional. Sin embargo, la visibilidad, la turbulencia y el tiempo que percibimos pueden variar enormemente en

distancias cortas (pocos kilómetros) y sus repercusiones pueden ser enormes. Es entonces donde los modelos de mesoescala brindan orientación, especialmente en situaciones tácticas en las que las observaciones meteorológicas en tiempo real son escasas o inexistentes (MetEd, 2008).

Las leyes físicas de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía rigen el desarrollo de las condiciones atmosféricas (Holton, 2004). Estas leyes se expresan por medio de una serie de ecuaciones matemáticas que componen el núcleo de lo que se denomina: “predicción numérica del tiempo”. En estas ecuaciones, las variables representan distintos aspectos del tiempo meteorológico (viento, presión, etc.). Como estas ecuaciones determinan la manera en que las variables cambian con el tiempo, si se conoce la condición inicial de la atmósfera, las ecuaciones pueden resolverse para un momento en el futuro y obtener valores nuevos para esas variables. Lo anterior es una explicación sencilla de cómo los modelos numéricos generan sus pronósticos (MetEd, 2008).

Por otra parte, los modelos de predicción numérica del tiempo no pueden resolver fenómenos que son demasiado pequeños o complejos para resolverse en forma numérica, por tanto, no están contemplados en las ecuaciones de éstos; y se vuelven importantes en escalas espaciales menores a las decenas de km (Gutiérrez *et al.*, 2004). El método de representar los efectos, debido a dichos fenómenos de escala menor a escala mayor sin calcularlos directamente, se conoce como parametrización. Se puede concebir la parametrización en términos de modelar los efectos de un proceso (emulación) en lugar de modelar el proceso en sí (simulación) (MetEd, 2008).

En la Figura 1 se representan algunos procesos físicos que ocurren cerca de la superficie: convección, evapotranspiración, radiación, entre otros, adicional a ellos, la formación de nubes es otro proceso que suele parametrizarse.

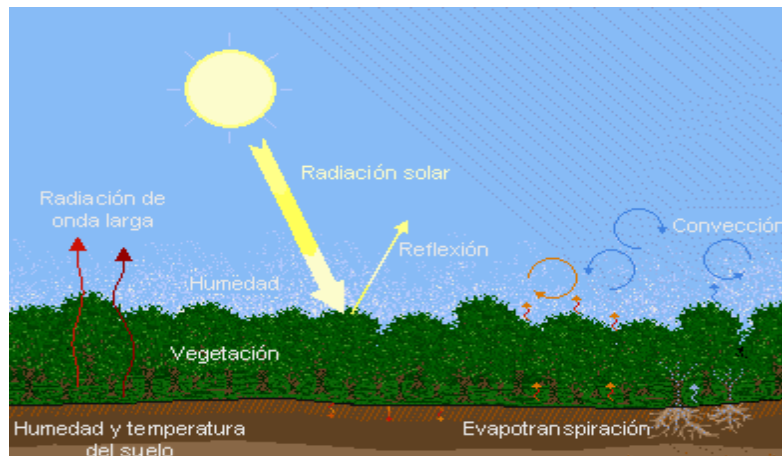


Figura 1. Procesos físicos cerca de la superficie que suelen parametrizarse.
Fuente: MetEd (2008).

3. MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

El sistema de modelado Weather Research and Forecasting (WRF) es resultado del esfuerzo de varias agencias por proporcionar un sistema de nueva generación de modelo de pronóstico de mesoescala que tiene como objetivo avanzar en la comprensión y predicción del tiempo meteorológico, así como acelerar la transferencia de los avances de la investigación hacia la parte operativa. El modelo está siendo desarrollado en conjunto por: National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centers for Environmental Prediction

(NOAA/NCEP), NOAA Earth Systems Research Laboratory Global Systems Division (NOAA/ESRL/GSD), National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale Microscale Meteorology Division (MMM), Department of Defense's Air Force Weather Agency (AFWA), Federal Aviation Administration (FAA), así como por científicos universitarios y colaboradores internacionales (Janjic *et al.*, 2010).

El modelo WRF cuenta con dos núcleos dinámicos; el Advanced Research WRF (ARW) y el Non-hydrostatic Mesoscale Model (NMM).

El WRF-NMM fue desarrollado por la NOAA/NCEP. Es un modelo de mesoescala o regional completamente compresible, no hidrostático con una opción hidrostática (Janjic, 2003).

El ARW es desarrollado principalmente por el NCAR. Es un subconjunto del sistema de modelado WRF que, además del núcleo, abarca esquemas para la física, opciones numéricas y dinámicas, rutinas de inicialización y un paquete de asimilación de datos (WRF-Var). Algunos paquetes para la física son ampliamente compartidos con el NMM (Skamarock *et al.*, 2008).

En el INIFAP se utiliza el software WRF Environmental Modeling System (EMS), el cual fue desarrollado por el National Weather Service (NWS), Science Operations Officer (SOO) y el Science and Training Resource Center (STRC). Un beneficio de utilizar el WRF EMS es que incorpora ambos núcleos dinámicos en un único modelo de pronóstico (Rozumalski, 2006). El software consiste en programas pre-

compilados que son fáciles de instalar y ejecutar. El WRF EMS contiene todas las opciones para la física disponibles para los núcleos ARW y NMM (Watson, 2007).

3.1. Ecuaciones gobernantes

3.1.1 Coordenada vertical y variables

Las ecuaciones del núcleo ARW son formuladas utilizando la coordenada vertical de presión y seguimiento del terreno, denotada por η ; y se define de la siguiente manera (Skamarock *et al.*, 2008):

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu}, \text{ donde } \mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (1)$$

p_h , es la componente hidrostática de la presión, p_{hs} y p_{ht} son los valores a lo largo de la superficie y frontera superior, respectivamente.

La definición de coordenada (1), propuesta por Laprise (1992), es la coordenada σ utilizada en muchos modelos hidrostáticos. η varía de 1 en la superficie a 0 en la frontera superior del dominio del modelo (Figura 2).

También, en las ecuaciones gobernantes del ARW aparecen las variables no conservadas $\phi = gz$ (el geopotencial), p (presión) y $\alpha = 1/\rho$ (el inverso de la densidad).

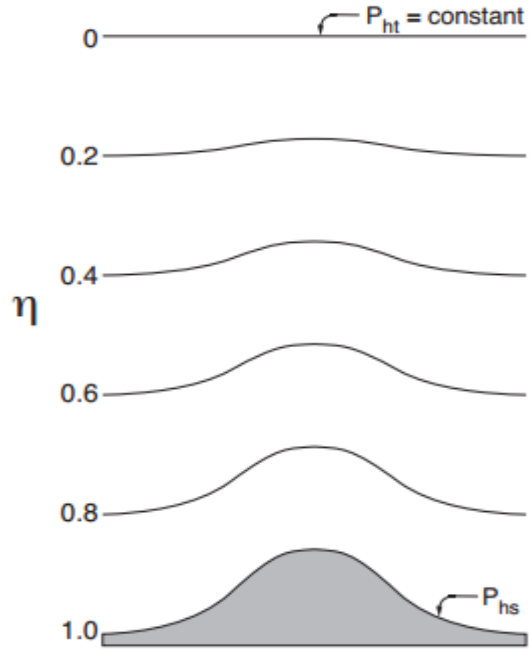


Figura 2. Coordenada η del ARW. Fuente: Skamarock *et al.* (2008).

3.1.2. Ecuaciones

Por simplicidad, se verá el flujo en coordenadas cartesianas y se despreciará el efecto de Coriolis, que es el efecto dominante que influye en el movimiento en un sistema de coordenadas fijo en la tierra (Stewart, 2008). Con estas restricciones, el modelo WRF resuelve las siguientes ecuaciones (Bianco, 2008):

Ecuación de estado:

$$p = \rho R_d T \quad (2)$$

Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Conservación del momento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} = -\frac{\partial Uu}{\partial x} - \frac{\partial Vv}{\partial y} - \frac{\partial Ww}{\partial z} + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} = -\frac{\partial Uv}{\partial x} - \frac{\partial Vv}{\partial y} - \frac{\partial Wv}{\partial z} + F_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial z} + g\rho = -\frac{\partial Uw}{\partial x} - \frac{\partial Vw}{\partial y} - \frac{\partial Ww}{\partial z} + F_z \quad (6)$$

Conservación de la energía:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} = \rho Q \quad (7)$$

y

$$U = \rho u, \quad V = \rho v, \quad W = \rho w, \quad \theta = \rho \theta$$

Donde (u, v, w) son las componentes de la velocidad en las direcciones (x, y, z) , θ es la temperatura potencial y ρ es la densidad del aire. Las otras variables que aparecen arriba son la temperatura absoluta T y la función de Exner:

$\pi = (p/p_0)^{(R_d/c_p)}$, donde p es la presión y $p_0 = 1000$ hPa es un valor de referencia (presión atmosférica en superficie). El calor específico a presión constante para el aire seco viene dado por $c_p = 1004.5 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ y $R_d = (2/7)c_p$ es la constante de los gases para el aire seco; F_x, F_y y F_z son términos de fricción.

3.2. Física del modelo

Las opciones de física del modelo WRF se dividen en varias categorías, (1) microfísica, (2) parametrización de cumulus, (3) capa límite planetaria (PBL), (4) modelo de superficie terrestre y (5) radiación; cada

una con varias opciones. Se mencionan sólo las utilizadas en la configuración del modelo presentado en la página web: <http://clima.inifap.gob.mx>. Para mayor información sobre estas y demás opciones dirigirse a la página de internet:

http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.2/users_guide_chap5.htm#Phys

3.2.1. Microfísica

Esquema de Milbrandt-Yau. Este esquema incluye categorías separadas para el granizo y granizo blando o suave (graupel) con doble momento para nubes, lluvia, hielo, nieve, granizo blando y granizo.

3.2.2. Parametrización de cumulus

Esquema de Betts-Miller-Janjic. Es el esquema operativo del modelo Eta.

3.2.3. Capa límite planetaria

Esquema de Mellor-Yamada-Janjic. Es el esquema operativo del modelo Eta. Incorpora la ecuación de pronóstico de la energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés) con mezcla vertical local.

3.2.4. Modelo de superficie terrestre

Esquema de modelo de suelo Noah LSM: Esquema unificado por NCEP/NCAR/AFWA con temperatura y humedad del suelo en cuatro capas, fracción de cobertura de nieve y física de suelo congelado.

3.2.5. Radiación

3.2.5.1. Radiación de onda larga

Esquema RRTM: Rapid Radiative Transfer Model. Utiliza tablas de consulta para la eficiencia. Cuenta con múltiples bandas, traza de gases y especies de microfísica.

3.2.5.2. Radiación de onda corta

Esquema Dudhia. Integración descendente simple que permite de manera eficiente para nubes y cielo despejado la absorción y dispersión.

3.3. Componentes del sistema de modelado WRF

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo para el WRF versión 3. Los programas principales del WRF son: WPS, WRF-Var, ARW y ARW_{post}.

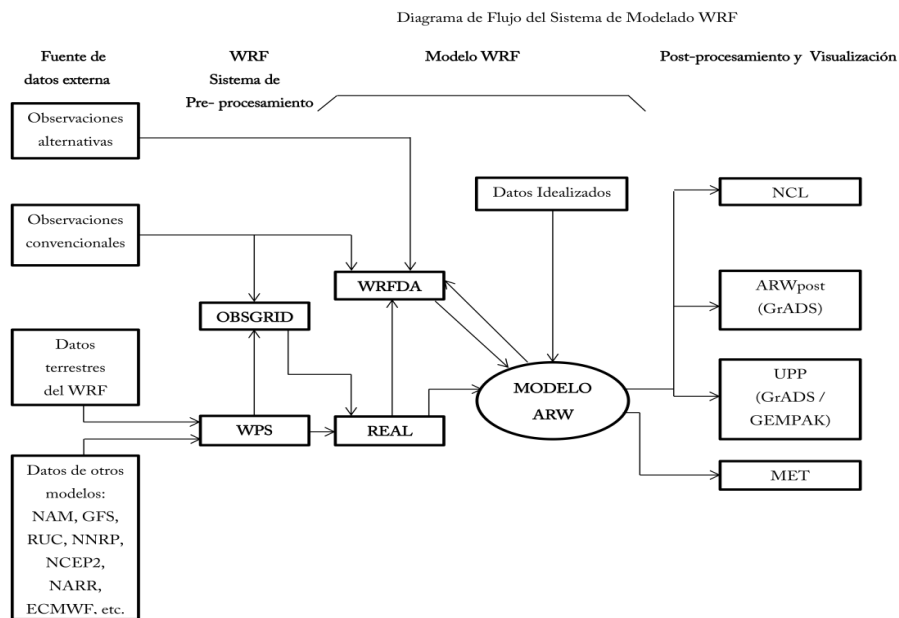


Figura 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del WRFv3.

3.3.1. WPS (WRF Preprocessing System)

Este programa se utiliza principalmente para simulaciones de datos reales. Sus funciones son: definir los dominios de simulación; interpolar los datos terrestres (terreno, uso y tipo de suelo) al dominio de simulación y decodificar e interpolar los datos meteorológicos de otro modelo al dominio de simulación.

El WPS consiste de tres programas independientes: geogrid, ungrib y metgrid.

3.3.2. WRF-DA

Este programa es opcional, puede ser utilizado para introducir observaciones en los análisis interpolados creados por WPS. También se puede utilizar para actualizar las condiciones iniciales del modelo WRF cuando se ejecuta en modo cíclico. En otras palabras, es el paquete de asimilación de datos del modelo al incluir observaciones adicionales.

3.3.3. ARW (Advanced Research WRF)

Este es el componente principal del sistema ya que contiene la física del modelo. Está compuesto de varios programas: ideal.exe, real.exe y wrf.exe, para la inicialización y posterior simulación de los datos reales mediante la integración numérica de las ecuaciones.

3.4. Configuración del WRF

Actualmente el modelo se integra por periodos de 120 horas (5 días) en un único dominio con resolución espacial horizontal de 13 km y una estructura vertical de 35 niveles desigualmente espaciados. Como condiciones iniciales y de frontera se utiliza el pronóstico de las 06 UTC

del Global Forecast System (GFS) a $.5^\circ \times .5^\circ$ de resolución. La Tabla 1 muestra la configuración actual del modelo.

Tabla 1. Configuración del modelo

Longitud de la simulación	120 horas (5 días)
Frecuencia de actualización de las condiciones de frontera	03 horas
Dinámica	No hidrostático
Esquema de cumulus	Betts-Miller-Janjic
Esquema de microfísica	Milbrandt-Yau
Esquema de capa límite planetaria	Mellor-Yamada-Janjic
Esquema de suelo	Noah 4-Layer LSM
Esquema de capa superficial	Monin-Obukhov (Janjic)
Radiación de onda larga	RRTM
Radiación de onda corta	Dudhia Scheme

4. GENERACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA A CINCO DÍAS

El WRF se inicializa todos los días a las 6:00 a.m. hora del centro, realiza una simulación de 120 horas de longitud. Los pronósticos de salida se tratan con el ARW post, el cual convierte las salidas del modelo en

archivos que pueden ser leídos por el software GrADS (Grid Analysis and Display System); en este último se realizan los mapas de lluvia y los datos se guardan en archivos de texto, éstos, a su vez, son tratados con el software GNU Octave con el fin de generar matrices que puedan visualizarse con otros software como, ArcGis y Surfer.

Una vez realizado el post-procesamiento de las salidas del modelo, las imágenes y archivos de texto son enviados a un servidor FTP (File Transfer Protocol) mediante un script de Shell (interprete de instrucciones de Linux).

Los procesos de descarga de datos del GFS, simulación realizada por el WRF, post-procesamiento y envío de la información al FTP y página Web se lleva a cabo aproximadamente en 2 horas y 40 minutos.

4.1. Acceso a la información

El acceso a la información generada por el modelo WRF, se logra ingresando a la página web: <http://clima.inifap.gob.mx/>, la cual es administrada por el Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del INIFAP. Al ingresar a esta página, se muestra el país con todas las estaciones dadas de alta en la Red Nacional de Estaciones Agroclimatológicas Automatizadas, en el lado izquierdo hay una caja de herramientas llamada “Pronósticos de clima”, la cual a su vez contiene un link llamado “Pronóstico Diario WRF” como se muestra en la Figura 4.

Para acceder al pronóstico de lluvia, dar click en el link marcado con círculo rojo (Figura 4), el cual lo lleva a la sección donde se muestra el pronóstico de lluvia acumulada en 24 horas y por períodos de cada 24

horas en 5 días (Figura 5), al hacer click en cualquiera de las cinco imágenes se accede al pronóstico de esa fecha como se muestra en la Figura 6.



Figura 4. Acceso al pronóstico de lluvia diaria, generado por el INIFAP.

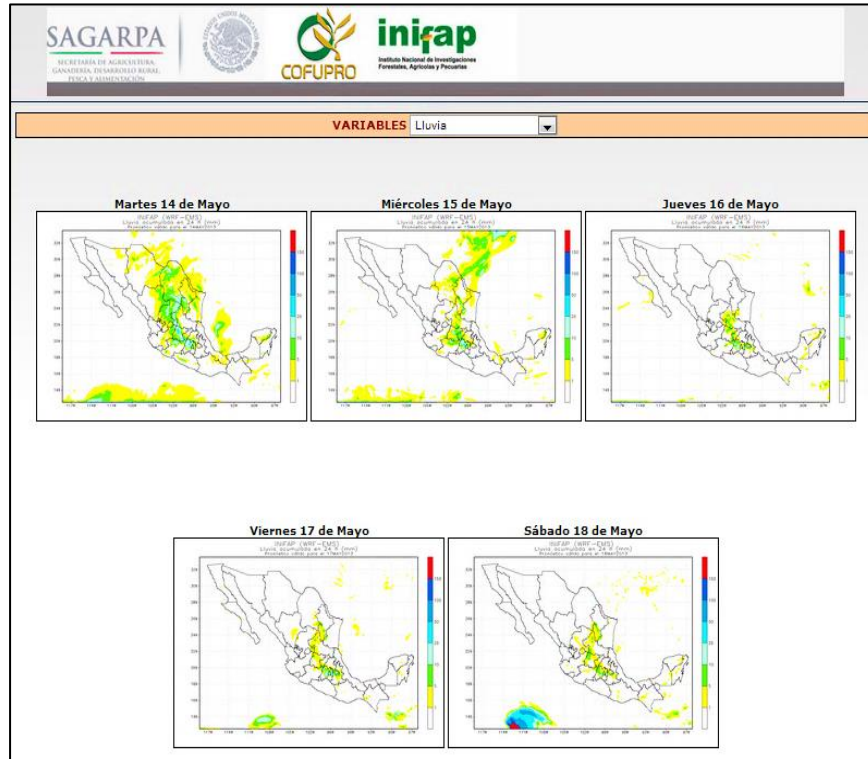


Figura 5. Pronóstico a 5 días de lluvia acumulada en 24 horas.

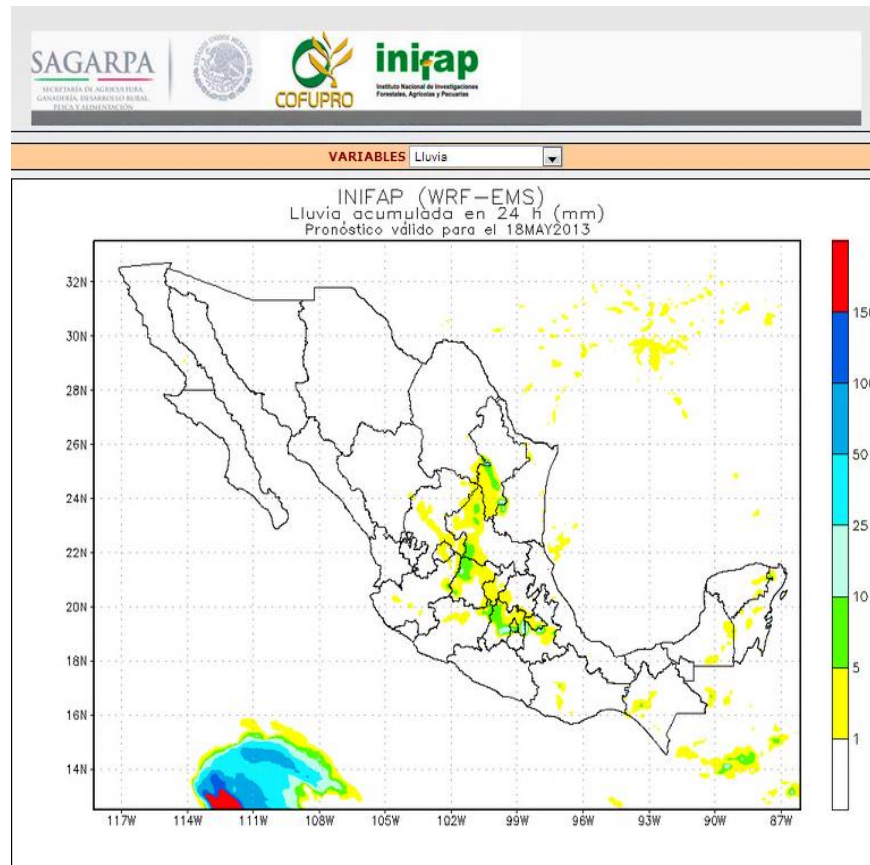


Figura 6. Pronóstico de lluvia acumulada en 24 horas para el día 18 de mayo de 2013.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA A CINCO DÍAS

5.1 Selección de puntos a evaluar

Un punto importante a considerar en la evaluación del modelo es que en los puntos de la malla donde el WRF entrega información no coinciden con el punto de ubicación de las estaciones Agroclimatológicas. Para realizar el análisis estadístico se escogen las estaciones que se encuentran en un radio de 6 km con respecto a los puntos de la malla y que cuenten con al menos 80% de datos por día; además, se supone que los puntos de malla y las estaciones se encuentran a la misma altitud. En cada rutina de validación realizada para el período Julio 2012-Febrero 2013, donde se aplicaron los criterios señalados el número de estaciones resultantes fue de 386.

5.2 Análisis estadístico

La precipitación es una de las variables más difíciles de pronosticar en la predicción numérica del tiempo, a pesar de que la exactitud de los modelos numéricos se ha incrementado en las últimas décadas (Wang and Seaman 1997, citado en Litta *et al.*, 2012a). Con el fin de evaluar la precipitación pronosticada con el WRF, respecto de la precipitación observada en las estaciones, se estima el Coeficiente de Correlación (CC), el Error Medio Absoluto (EMA) y el Sesgo (BIAS) mediante:

$$CC = \frac{\sum (f_i - f) (o_i - o)}{\sqrt{(\sum (f_i - f))^2 (\sum (o_i - o))^2}} \quad (9)$$

$$EMA = (1/N) \sum_{i=1}^N |f_i - o_i| \quad (10)$$

$$BIAS = (1/N)\sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \quad (11)$$

Donde f_i es el dato pronosticado, o_i el valor observado por la estación agroclimatológica, f y o son los promedios del dato pronosticado y observado, respectivamente, y N el número de observaciones.

En la Tabla 2 se muestra un promedio realizado con los estadísticos de cada punto evaluado (386) para el periodo Julio 2012 a Febrero 2013, así como la precipitación acumulada promedio simulada y observada en cada punto evaluado para el periodo antes mencionado.

Tabla 2. Estadísticos promedio de todos los puntos evaluados durante Julio 2012-Febrero 2013. Promedio de lluvia acumulada simulada y observada para los mismos puntos y mismo periodo.

Variable analizada	Día de simulación	EMA (mm)	BIAS (mm)	CC	Simulada (mm)	Observada (mm)
Precipitación	1	2.26	-0.17	0.35	270.21	304.36
	2	2.32	-0.11	0.34	274.23	
	3	2.44	-0.05	0.29	294.20	
	4	2.47	-0.06	0.28	281.72	
	5	2.61	0.05	0.23	298.38	

Los resultados sugieren una correlación positiva baja y una tendencia a subestimarla. Los días 1 y 2 mostraron un mayor coeficiente de correlación y un EMA menor respecto a los días 3, 4 y 5.

La precipitación acumulada promedio observada y modelada para cada punto de evaluación es muy similar para todos los días de simulación.

6. CONCLUSIONES

La disponibilidad de un pronóstico de lluvia a corto plazo brinda una orientación útil en la toma de decisiones en la agricultura, mayormente en áreas donde las observaciones meteorológicas en tiempo real son escasas o inexistentes.

Conforme a literatura, un modelo de mesoescala o de tipo regional brinda mejores resultados que uno de escala mayor porque puede ejecutar esquemas sofisticados que pronostican la precipitación, al tomar en cuenta los procesos físicos internos de menor escala como la formación de nubes y transferencia de calor.

El modelo WRF núcleo ARW muestra un buen comportamiento en el pronóstico de lluvia, aunque no se vea reflejado en el análisis estadístico, ya que es una variable que por su naturaleza, al evaluar de forma directa, por lo general, da valores bajos.

Los valores del CC estimados en este trabajo son similares a los mostrados por Litta *et al.*, 2012b.

Es necesario integrar otros estadísticos de validación, como lo es, comparar rangos observados contra rangos simulados, los cuales pudieran indicar la magnitud de certeza que tiene el modelo en el pronóstico de precipitación.

Para mejorar su desempeño es necesario realizar más estudios con distintas parametrizaciones, aumentar la resolución horizontal y vertical e investigar el módulo de asimilación de datos.

7. LITERATURA CITADA

- Bianco, L. The Weather Research & Forecasting Model (WRF) [en línea]. 2008. [Consulta: Mayo de 2013]. Disponible en: <http://cires.colorado.edu/science/groups/pielke/classes/at7500/Bianco_PresentationWRF.pdf>
- Gutiérrez, J. M.; R. Cano, A. S. Cofiño y S. M. Sordo. 2004. Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. p. 10. ISBN: 84-8320-281-6.
- Holton, J.R. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press. Fourth Edition. ISBN: 0-12-354015-1.
- Janjic, Z. I. 2003. A nonhydrostatic model based on a new approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 82, no. 1-4, pp. 271-285.
- Janjic, Z.; R. Gall, and M. E. Pyle. 2010. Scientific Documentation for the NMM Solver. NCAR Technical Note, NCAR/TN- 477+STR, 54 pp.
- Laprise, R. 1992. The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable. *Mon. Wea. Rev.* 120, pp. 197-207.
- Litta, A. J.; U. C. Mohanty and Sumam Mary Ididcula. 2012a. The diagnosis of severe thunderstorms with high-resolution WRF model. *Journal of Earth System Science*, vol. 121, No. 2, April 2012, pp. 297-316.

- Litta, A. J.; Sumam Mary Ididcula, U. C. Mohanty, and S. Kiran Prasad. 2012b. Comparison of Thunderstorm Simulations from WRF-NMM and WRF-ARW Models over East Indian Region. *The Scientific World Journal*, vol. 2012, Article ID 951870, 20 pages, 2012. doi:10.1100/2012/951870
- MetEd. Funcionamiento de los modelos de mesoescala [en línea]. 2008. [Consulta: Mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/models_es/print.htm>.
- Prieto, R.; Ma. A. Avendaño, L. G. Matías y H. Eslava. 2010. *Tormentas severas. Serie Fascículos*. 1a. edición, México, CENAPRED, México. p. 3. ISBN: 978-607-7558-08-8.
- Ramírez, C. A. y J. C. Cuevas. 2012. Sistema automático para la predicción de desastres meteorológicos en las ciudades. *Ide@s CONCYTEG*, 7 (86), pp. 1021-1048.
- Rozumalski, R., 2006. WRF Environmental Modeling System User's Guide. NOAA/NWS SOO Science and Training Resource Coordinator Forecast Decision Training Branch, 89 pp. [Available from COMET/UCAR, P.O. Box 3000, Boulder, CO, 80307-3000].
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, Xiang-Yu Huang, W. Wang, Jordan G. Powers. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp.

Stewart, R. H. Introduction To Physical Oceanography [en línea]. 2008. [Consulta: Agosto de 2013]. Disponible en: <http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book_pdf_files.html>.

Wang, W. and N. L. Seaman. 1997. A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Weather Rev.* (125) 252-278.

Watson, L. R. 2007. Weather Research and Forecasting Model Sensitivity Comparisons for Warm Season Convective Initiation. NASA Contractor Report, NASA/CR-2007-214734, 43 pp.

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



- Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- Campo Experimental

Comité Editorial del CEPAB

Dr. Alfonso Peña Ramos
Dr. Luis Reyes Muro
Dr. José Saúl Padilla Ramírez
Ing. Francisco Javier Robles Escobedo
M.C. Fernando González Castañeda
M.C. Luis Martín Macías Valdez
Dr. Manuel Antonio Galindo Reyes

Revisión Técnica

Dr. Víctor Manuel Rodríguez Moreno

Edición

M.C. Fernando González Castañeda

Diseño y Fotografía

M.C. Arturo Corrales Suastegui

Código INIFAP

MX-0-250901-52-02-10-09-53

La presente publicación se digitalizó en diciembre de 2013 en el Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos,
Km. 32.5 Carretera Aguascalientes-Zacatecas. Pabellón de Arteaga, Ags.
CP 20660
Pabellón de Arteaga, Ags., México.

Copia digital: 500 ejemplares.

Campo Experimental Pabellón

Dr. Alfonso Peña Ramos Director de Coordinación y Vinculación

Personal investigador

Dra. Alma Delia Báez González Agrometeorología y modelaje
M.C. Arturo Corrales Suastegui Agrometeorología y modelaje
M.C. Miguel Angel González González Agrometeorología y modelaje
Ing. Luis Antonio González Jasso Agrometeorología y modelaje
Ing. Mario Primitivo Narváez Mendoza Agrometeorología y modelaje
Ing. José Luis Ramos González Agrometeorología y modelaje
Dr. Víctor Manuel Rodríguez Moreno Agrometeorología y modelaje
Dr. Esteban Salvador Osuna Ceja Fertilidad de suelos y nutrición vegetal
Ing. Sergio Arellano Arciniega Frijol y garbanzo
M.C. Miguel Ángel Perales de la Cruz Frutales
Dr. José Saúl Padilla Ramírez Frutales
Dr. Manuel A. Galindo Reyes Frutales
M.C. Luis Martín Macías Valdez Hortalizas
M.C. Luis Humberto Maciel Pérez Ingeniería de riego
M. C. Osías Ruiz Álvarez Ingeniería de riego
M.C. Fernando González Castañeda Leche
M.C. Omar Iván Santana Leche
Ing. Francisco Javier Robles Escobedo Maíz
Ing. Alejandro Hernández Escudero Mecanización
Ing. Ernesto Martínez Reyes Mecanización
Ing. Carlos Rojas Santillán Mecanización
M.Sc. Abraham de Alba Ávila Pastizales y cultivos forrajeros
M.C. Luis Antonio Díaz García Sanidad forestal y agrícola
M.C. Ernesto González Gaona Sanidad forestal y agrícola
Dr. Guillermo Sánchez Martínez Sanidad forestal y agrícola
Dra. Mercedes Borja Bravo Socioeconomía
Dr. Luis Reyes Muro Socioeconomía

WWW.INIFAP.GOB.MX

[HTTP://CLIMA.INIFAP.GOB.MX](http://CLIMA.INIFAP.GOB.MX)

Es evidente la vulnerabilidad de México a los riesgos hidrometeorológicos como: huracanes, inundaciones, sequía, heladas, granizo, lluvia de alta intensidad y otros riesgos asociados a su presencia, como desprendimientos de tierra, afectaciones a los cultivos.

La disponibilidad de un pronóstico de lluvia a corto plazo brinda una orientación útil en la toma de decisiones en la agricultura, mayormente en áreas donde las observaciones meteorológicas en tiempo real son escasas o inexistentes.