

Simulación de la temperatura en la Tierra Caliente del Estado de Michoacán, utilizando el modelo meteorológico de Mesoescala WRF

Alain Mbikayi T.¹, Christian Morales O.², Erasmo Cadenas C.³

^{1,3}Facultad de Ingeniería Mecánica; ²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. UMSNH

Resumen

Se presentan los resultados del modelado de una ola de calor ocurrida en la zona de la Tierra Caliente en el Estado de Michoacán, en el mes de mayo del año 2018. La herramienta de modelado fue el software de plataforma libre denominado Weather Research and Forecasting (WRF), que es un modelo de predicción numérica del tiempo de mesoescala que, a diferencia de los modelos meteorológicos globales, toman en cuenta la topografía y las condiciones del terreno, para generar condiciones de simulación más apegadas a la realidad. Para reproducir el fenómeno meteorológico de la ola de calor, se simularon las temperaturas horarias del 28 de mayo al 03 de junio del año 2018, debido a que las mediciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), indican que en esas fechas ocurrió la ola de calor en algunas zonas del país, dentro de las cuales se

encontraba el estado de Michoacán. Los resultados arrojados por las simulaciones demuestran que, en algunos lugares de la Tierra Caliente, del Estado de Michoacán, las temperaturas en esas fechas superaron los 40°C, lo que permite establecer la utilidad del modelo generado, el cual se puede utilizar para futuras simulaciones y para distintas variables meteorológicas, además de que se puede integrar como una herramienta útil de prevención civil.

Palabras clave: Michoacán, Ola de calor, WRF.

Abstract

This work presents the results of the simulation of a heatwave which took place in the region of Tierra Caliente in the State of Michoacán, in the month of May 2018. The modelling tool used was the open source software Weather Research and Forecasting (WRF), which is a mesoscale numerical weather research program, unlike global meteorological models, take in account topography and ground conditions, to generate better modelling conditions closer to reality. According to the reports of the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), the heatwave event occurred from the 28th of May to the 3rd of June of 2018 in some regions of the country, including Michoacán. The results issued by the model show that in some areas of Tierra Caliente in the State of Michoacán temperatures rise above 40 °C, which allows establishing the usefulness of the generated model, that can be used for future modelling of various meteorological variables, also might be integrated like a useful tool for civil defence system for disaster prevention.

Introducción

En la actualidad los efectos del cambio climático son cada día más evidentes y en muchos ámbitos afectan directamente el bienestar del ser humano en el planeta. De acuerdo al último Informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se estima que las actividades humanas han causado un incremento en la temperatura global de aproximadamente 1.0 °C, con respecto a los niveles preindustriales, con una variación de 0.8°C a 1.2°C. Es probable que el calentamiento global incremente la temperatura promedio del planeta en 1.5°C entre los años 2030 y 2052, si continúa aumentando al ritmo actual. (IPCC, 2019).

En muchas regiones del mundo ya se está experimentando el cambio climático con eventos extremos tales como: un aumento de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas, episodios de calor extremo en la mayoría de las regiones habitadas, precipitaciones intensas en varias regiones y la probabilidad de sequías y déficits de precipitación en algunas regiones.

La República Mexicana no está exenta de los efectos del cambio climático, éste se ha reflejado en la desertificación de muchas regiones del norte del país, que se están convirtiendo en terrenos estériles, lo que significa desecamiento de ríos, muerte de especies animales y vegetales e impacto en los mantos freáticos.

Otros ejemplos son: el aumento de la temperatura en la Ciudad de México (en los últimos años hubo un incremento de casi 4°C), el aumento de tormentas intensas ya sea en Motozintla, Chiapas o en Ciudad Juárez, Chihuahua, la aceleración de la pérdida de bosques y vegetación en nuestro país, junto con los incendios forestales, que se asocian también con el aumento de la temperatura. (SERMANAT, 2016).

En la actualidad la medición de temperaturas se realiza a través de una estación meteorológica, pero existen pocos sitios que garanticen una calidad en los datos adecuada, además en la mayoría de las veces, las mediciones son inconsistentes en cuanto a los periodos de medición. (Yip, 2016).

Existen, sin embargo, los datos del Research Data Archive (Reanalysis o reanálisis), los cuales proporcionan un registro de variables atmosféricas equiespaciadas, que son representativas de la circulación atmosférica global. Recientemente se ha creado una nueva generación de datos de reanálisis como: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA Interim Simmons, (2007), National Centres for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (NCEP-CFSR) Saha, (2010) y la NASA's Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications (NASA-MERRA) (Simmons, 2007, Rienecker, 2011, Mitch, 2010, y Skamarock, 2008).

Los modelos numéricos para la simulación del clima funcionan utilizando datos de reanálisis. En la actualidad existen varios modelos de mesoescala que se pueden utilizar de manera gratuita como: Weather Research and Forecast Model (WRF) Skamarock, (2008), fifth-generation Meso-scale Model (MM5) Grell, (1995), Regional Atmospheric Modelling System model (RAMS). Pielke, 1992.

Los métodos de simulación numérica de mesoescala, en comparación con los métodos estadísticos o de inteligencia artificial utilizados en la predicción, pueden

obtener valores de parámetros atmosféricos ubicados en cualquier región del planeta. Estos métodos están ganando popularidad en la evaluación de eventos meteorológicos, que realizan las comunidades científicas alrededor del mundo.

Como lo describe Zahra (2020), utilizan el modelo WRF para modelar con éxito una isla de calor urbana en Toronto, Canadá, con la finalidad de contar con futuras predicciones que ayuden a implementar estrategias de prevención, demostrando la utilidad del modelo en la práctica operativa. Otro enfoque de la utilización del modelo WRF lo da Le Roux (2019), que utiliza el modelo para el área de viñedos más grande de Nueva Zelanda, para predecir la temperatura en un área con una resolución de 1 km. Kaniz (2020), predicen las condiciones de una ola de calor y sus características termodinámicas en Bangladesh, en un dominio de 10 km, demostrando los beneficios sociales y económicos que puede traer un modelo de predicción de eventos meteorológicos de mesoescala. Además de la predicción de temperatura, el modelo WRF puede predecir diversas variables meteorológicas como la precipitación, la formación de nubes, etc.

Por lo anterior el presente trabajo tuvo como objetivo generar un modelo de mesoescala del Estado de Michoacán, que pronostique diversas variables meteorológicas en un horizonte de tiempo hasta de 48 horas, con la finalidad de aportar una herramienta de prevención contra eventos meteorológicos extremos.

Para ejemplificar el uso del modelo se tomó como referencia la ola de calor ocurrida en el año 2018, de la cual sólo tenemos como referencia las temperaturas publicadas por los diversos medios de información y el clima promedio de la región registrado en el Reporte del Clima en México CONAGUA, (2018). El modelo pudo reproducir en un rango aceptable la temperatura ocurrida en las fechas seleccionadas.

El Estado de Michoacán

El estado de Michoacán de Ocampo se sitúa hacia la porción centro—oeste de la República Mexicana, entre las coordenadas 20° 23' 27" y 17° 53' 50" de la latitud norte y entre 100° 03' 32" y 103° 44' 49" de la longitud oeste del meridiano de Greenwich. Limitado al norte con los estados de Jalisco y Guanajuato, al noroeste con el estado de Querétaro, al este con los estados de México y Guerrero, al oeste con el Océano Pacífico y los estados de Colima y Jalisco, al sur con el Océano Pacífico y el estado de Guerrero, Durán (2003). Michoacán se encuentra adyacente al Océano Pacífico, con el que tiene una extensión de costas de 208 km; la cercanía

del Golfo de México (420 km de Morelia, Michoacán) también ejerce una influencia en la humedad, aunque menor que la del Pacífico. Durante el verano, al desplazarse la zona subtropical de alta presión al Norte, los vientos alisios tienen mayor influencia y soplan en superficie con una dirección ENE, recogiendo humedad del Golfo de México. Los huracanes o ciclones tropicales que afectan al país, se presentan en verano y en otoño, desde la última decena de mayo a la primera quincena de octubre.

De acuerdo con el INEGI (2020), en el 54.5% del estado el clima es cálido subhúmedo, localizado en la planicie costera del Pacífico y Sierra Madre del Sur, el 29% templado subhúmedo en Eje Neovolcánico, 15% seco y semiseco, localizado en las partes bajas y medias de la depresión del Balsas y Tepalcatepec, 1% templado húmedo y el 0.5% cálido húmedo se presentan regiones altas de Eje Neovolcánico, Figura 1. La temperatura media anual es de 20°C, las temperaturas más bajas se presentan en el mes de enero, es alrededor de 8°C, la temperatura máxima promedio es de 31°C y se presenta en los meses de abril y mayo. Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 850 mm anuales. Los climas cálido y templado subhúmedo de Michoacán favorecen el cultivo de aguacate, siendo este estado, el principal productor a nivel nacional.



Figura 1. Los climas de Michoacán. Fuente: INEGI, escala: 1:1000000

La ola de calor del año 2018 en el Estado de Michoacán

Las olas de calor se producen a causa de una masa de aire caliente proveniente de otro continente. Los criterios para establecer que una elevación de la temperatura se trata en realidad de una ola de calor son los siguientes:

- Que las temperaturas en el lugar y época estudiados sean superiores a las habituales.
- Que éste aumento medio de la temperatura tenga una dimensión superior a uno o dos días.
- Que la extensión no se limite a una sola zona, sino que sea extensiva a un territorio.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) considera que una ola de calor es un evento meteorológico extremo unido al calentamiento pronunciado del aire en un área extensa. Este calor anómalo, por lo general dura de unos pocos días a algunas semanas. Este tipo de eventos extremos, se han incrementado en el contexto del cambio climático por el que atraviesa nuestro planeta. (OMM, 2020).

Las consecuencias de una ola de calor son básicamente las sequías y el difícil acceso al agua y todo lo que conlleva lo anterior.

Según la CONAGUA a nivel nacional el mes de mayo del 2018, se clasificó como el mes más cálido desde 1971 en los registros de temperatura media. Los promedios diarios de temperatura superaron el umbral de la media con dos desviaciones estándar adicionales, siendo más evidente en la última semana del mes, ver Figura 2.

En Michoacán, en el año 2018, a finales del mes de mayo, se emitió por parte de las autoridades de protección civil estatal, una declaratoria de emergencia extraordinaria para 34 municipios ubicados principalmente en la zona de la Tierra Caliente y Centro de la entidad.

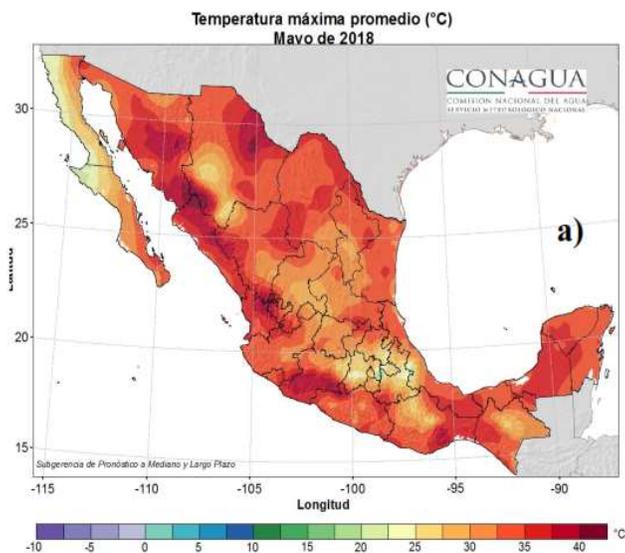


Figura 2. Temperatura promedio en México, mayo del 2018 (CONAGUA, 2018).

Entre las demarcaciones afectadas por las altas temperaturas que alcanzaron los 45°C, se encuentran Tiquicheo, San Lucas, Huetamo, Parácuaro, Nocupétaro, Turicato, Churumuco, La Huacana, Ario de Rosales, Gabriel Zamora, Múgica, Tumbiscatío, Apatzingán, Buenavista, Tepalcatepec, Aguililla, Coalcomán, Chinicuila, Carácuaro, en la parte de la Sierra y Tierra Caliente. (El Universal, 2018).

De acuerdo con la CONAGUA la temperatura máxima promedio a nivel nacional en mayo del 2018 fue de 33°C, 1.7°C por arriba del valor promedio. Promedios de temperatura máxima mayores a 40.0°C se observaron en Sonora, Chihuahua, Sinaloa así como en los límites de Nayarit, Durango, Jalisco y Michoacán.

El modelo WRF para el Estado de Michoacán

Los modelos de predicción numérica del tiempo son modelos matemáticos que se utilizan para predecir el estado futuro de la atmósfera, partiendo de su estado actual. Para generar un modelo de este tipo se requieren sistemas de cálculo potentes, por lo que la predicción acertada del clima por este medio está vinculada directamente al avance computacional.

Cuando se habla de simulaciones del clima o del pronóstico del clima, implica referirse necesariamente a los fenómenos atmosféricos que presentan dimensiones espaciales y temporales, por lo anterior, la comunidad científica dedicada al tema, ha establecido diferentes escalas que permiten delimitar el área estudiada. En esa clasificación se encuentran los modelos regionales y Meso-escalares conocidos como LAM (*Limited Area Model*), dentro de los cuales uno de los más utilizados es el modelo generado por la National Center for Atmospheric Research a través del proyecto denominado Weather Research Forecast (WRF [Weather Research and Forecasting Model], 2020).

Los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT) usan modelos matemáticos de la atmósfera para predecir el tiempo, basados en las condiciones actuales del tiempo. Las bases teóricas de la predicción numérica del tiempo provienen de la dinámica atmosférica, la cual provee las ecuaciones que describen la evolución de la atmósfera.

Los modelos atmosféricos son creados a partir de las ecuaciones del movimiento, la ecuación de la conservación de la masa (ecuación de la continuidad), ecuación de la conservación de la energía (o simplemente ecuación termodinámica), ecuación de la conservación del vapor del agua y la ecuación del estado (Coiffier, 2011).

$$\frac{dV_3}{dt} = -2\Omega \times V_3 - \frac{1}{\rho} \nabla_3 p - \nabla_3 \Phi + F, \text{ Ecuación del momento (1)}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R}{c_p} \frac{T}{p} \frac{dp}{dt} + \frac{Q}{c_p}, \text{ Ecuación de la termodinámica (2)}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla_3 \cdot V_3, \text{ Ecuación de la continuidad (3)}$$

$$\frac{dq}{dt} = M, \text{ Ecuación del vapor del agua (4)}$$

$$p = \rho RT, \text{ Ecuación del estado (5)}$$

El geopotencial Φ es definido como el producto de la altura Z por la aceleración de la gravedad (g), el cual combina solamente los efectos de la gravedad Newtoniana y de la fuerza centrífuga (asumiendo que la Tierra está aislado en el espacio y

haciendo caso omiso del efecto de los otros cuerpos en el sistema solar); es expresado en $J.kg^{-1}$ en unidades del SI:

$$\Phi = g \times z - \frac{\Omega^2 r^2 \cos^2 \varphi}{2} = gZ, (6)$$

Donde Ω es la velocidad angular de la rotación de la Tierra, r la distancia radial medida desde el centro de la Tierra y $r \cos \varphi$, la distancia hasta el eje de rotación de la Tierra a una latitud φ .

En las ecuaciones (1) y (3), V_3 representa la velocidad del viento en sus tres dimensiones, Ω el vector de la velocidad angular de la Tierra, ρ es la densidad del aire, p la presión, T la temperatura, q la humedad específica, R y C_p la constante del gas perfecto y el calor específico a presión constante del aire. El símbolo ∇_3 describe el operador gradiente y el símbolo $\nabla_3 \cdot$ el operador divergente. El término $-2\Omega \times V_3$ representa la aceleración de Coriolis y F, Q y M el momento, el calor y la humedad específica, respectivamente.

El modelo WRF que es un software de predicción numérica del tiempo de dominio público y libremente disponible y que puede ser utilizado tanto la investigación como para el trabajo operativo.

A diferencia de los modelos meteorológicos globales, los modelos de mesoescala toman en cuenta la topografía y las condiciones del terreno, aunque dependen directamente de los modelos globales, ya que en éstos se generan las condiciones iniciales o de fronteras necesarios para que el modelo mesoescalar funcione.

Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo de mesoescala WRF es considerado un modelo de última generación, diseñado para ser aplicado tanto en pronósticos operativos del tiempo, como en investigación de fenómenos meteorológicos, permitiendo integrar a la comunidad científica y los centros de pronóstico de todo el mundo. Es un modelo de simulación de la atmósfera de área limitada, no hidrostático, sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescalar y regional. Resuelve a través de parametrizaciones en radiación, desarrollo de nubes, capa límite planetaria y otros esquemas físicos, procesos de la micro y mesoescala en la atmósfera a partir de datos globales que ofrecen los modelos de baja resolución. Como ya se mencionó, es un modelo no hidrostático, lo que le permite ser usado en la escala de unos pocos kilómetros, aunque también

permite correr bajo condiciones hidrostáticas. Actualmente es usado en diferentes regiones del mundo por ser un modelo robusto y de fácil acople a las diferentes condiciones de cada región, tales como topografía, vegetación, superficies de agua y uso del suelo. El WRF ha sido desarrollado en colaboración entre *The National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *The National Center for Atmospheric Research* (NCAR) y otras organizaciones. Guerrero, (2013).

Tiene dos núcleos dinámicos para la solución de las ecuaciones de pronóstico: el Non-hydrostatic Mesoscale Model (WRF-NMM), orientado a la predicción operacional y el Advanced Research WRF (WRF-ARW), orientado a la investigación. El núcleo ARW fue diseñado para ser portable, eficiente y con capacidad de ejecución en plataformas de computo paralelo, Montiel, (2016).

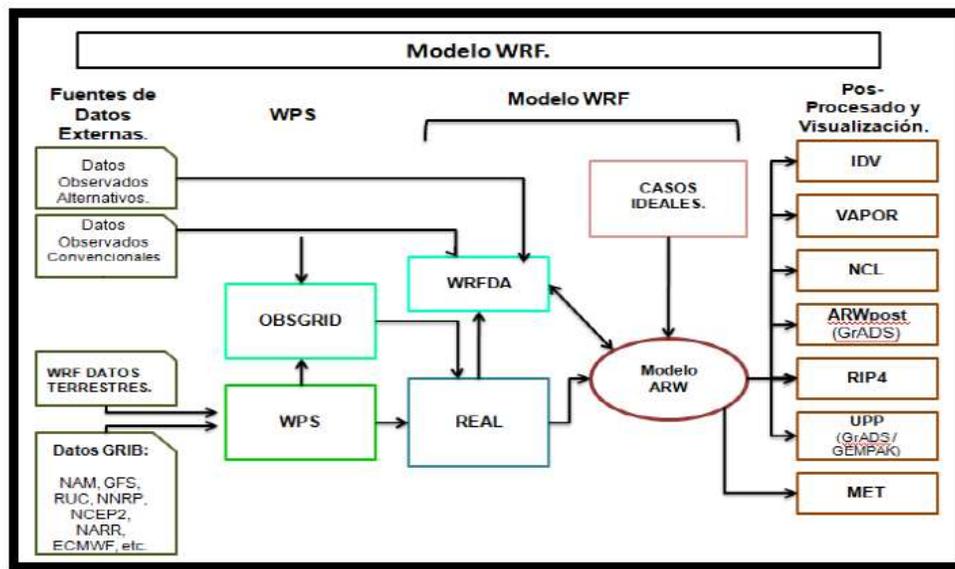


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo WRF (Montiel, 2016)

Componentes del modelo WRF

El modelo WRF se compone de los siguientes programas:

- WRF Pre-processing System (WPS).
- WRF-DA.
- Núcleo ARW.
- Herramientas de pos-procesamiento y visualización.

Un esquema simplificado de los componentes del programa WRF es representado en la figura 3.

Modelación de la simulación para la zona de la Tierra Caliente

Para generar un modelo de mesoescala con WRF para el Estado de Michoacán, se obtuvieron datos de reanálisis perteneciente a la base de datos denominada NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids, de la National Center for Atmospheric Research (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>), en el periodo de simulación comprendido entre el 27 de mayo y hasta el 3 de junio del año 2018.

Las simulaciones de análisis fueron realizadas en dos dominios anidados horizontalmente, centrados sobre la ciudad de Morelia con coordenadas 19° 42' 02" N y 101° 11' 03" O).

El dominio principal fue definido como 70 x 80 puntos de malla y 30 Km de resolución espacial, cubriendo todo el territorio de la República Mexicana.

El dominio secundario fue definido como 133 x 133 puntos de malla y 10 Km de resolución horizontal, abarcando la Zona Centro y Centro Occidente de la República Mexicana, ver Figura 4.

El tiempo inicial de la Figura 4, representa el tiempo 00 del día 27 de mayo de 2018, en un lapso de cada 3 horas hasta llegar a las 24 horas correspondientes al día 1, de simulación.

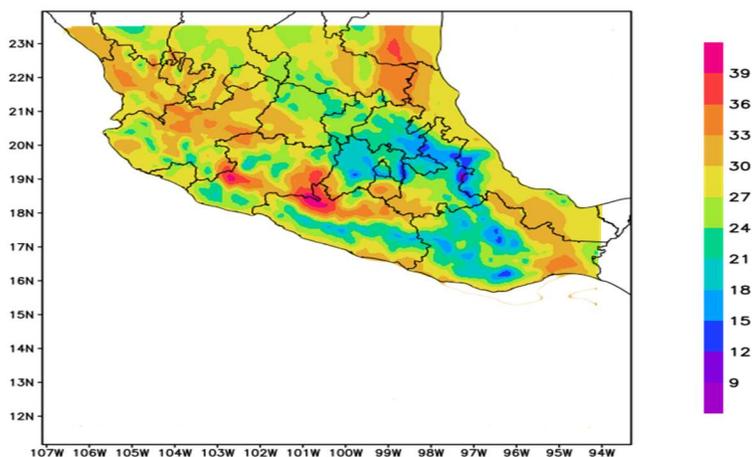


Figura 4. Dominio de análisis que muestra la temperatura simulada en el tiempo inicial del modelo

La configuración de los esquemas de parametrización utilizada para nuestro caso de estudio se describe en la tabla 1.

TABLA 1
Configuración de los esquemas de parametrización.

Esquema	Dominio Principal	Dominio Secundario
Micro física	WRF Single moment 6 class	WRF Single moment 6 class
Radiación de onda larga	Rapid Radiative Transfer Model	Rapid Radiative Transfer Model
Radiación de onda corta	Rapid Radiative Transfer Model	Rapid Radiative Transfer Model
Capa superficial	ETA Similarity	ETA Similarity
Superficie de suelo	NOAH LAND Surface Model	NOAH LAND Surface Model
Capa límite planetaria	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level 3	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level 3

Parámetros estadísticos para evaluar un modelo numérico

De acuerdo con Borrego (2008), cada parámetro estadístico tiene un papel en la evaluación del rendimiento y la estimación de la incertidumbre de un modelo, pero algunos de ellos pueden ser considerados muy importantes. Un modelo de pronóstico numérico del tiempo (PNT) puede ser evaluado a partir de una comparación con datos meteorológicos observados usando algunas medidas estadísticas del error: el error medio, ME (Mean Error), el error porcentual medio absoluto, MAPE (Mean Absolute Percentage Error), la raíz del error cuadrático medio, RMSE (Root Mean Square Error) y el error de la desviación estándar, SDE (Standard Desviation Error).

ME

El error medio o sesgo es un parámetro crucial para evaluar el rendimiento de un modelo y su objetivo es mostrar si el pronóstico del parámetro es sobreestimado o subestimado.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i - y_p \quad (7)$$

MAPE

La media de los errores porcentuales en valor absoluto es la diferencia entre el valor real y el valor pronosticado y dividido por el valor real, no considera el signo del error sólo la magnitud.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - y_{ip}}{y_i} \right| \quad (8)$$

RMSE

Es una medida de desempeño cuantitativa que mide la magnitud total del error del modelo. Como los errores están elevados al cuadrado antes de ser promediados, la RMSE da un peso relativamente alto a los errores altos. Eso significa que la RMSE es muy importante cuando los errores son particularmente indeseables y su valor es cero para casos ideales.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ip})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

SDE

Evalúa la dispersión del error y es un parámetro importante por el hecho que, aunque el pronóstico tenga un RMSE o ME alto, si el SDE es bajo eso significa que el error es constante y puede ser compensado y el pronóstico es correcto. Si el SDE es alto, el error es aleatorio y el pronóstico incorrecto, a pesar que tenga un RMSE o ME bajo.

$$SDE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(y_i - y_{ip}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ip}) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Donde N es el número de datos, y_i es el valor real, y_{ip} es el valor pronosticado.

En el presente trabajo no se efectuaron las comparaciones estadísticas generales para la evaluación y estimación de incertidumbre del modelo numérico, para simular la temperatura en la zona de Tierra Caliente, debido a que las estaciones meteorológicas en dichas zonas en la base de datos de la CONAGUA, no almacenan los datos en algún sitio público o muchas de esas estaciones tampoco funcionan, o no se les da el mantenimiento adecuado para poder tener datos reales precisos.

Análisis de resultados

Una vez generadas las simulaciones con el modelo, se obtuvieron los datos de temperatura de la zona conocida como la Tierra Caliente del estado de Michoacán, eligiendo los municipios de Tepalcatepec, Buena Vista, Apatzingán, La Huacana, Ario, Turicato, Huetamo y Tiquicheo, que fueron los que coincidieron con los puntos de Malla del modelo para nuestro análisis.

De la Figura 5 se aprecia cómo en todos los municipios mencionados la temperatura tuvo un incremento gradual por día, presentándose las mayores temperaturas en el último día de simulación.

De la misma manera se aprecia en la Figura 5 cómo la temperatura para los municipios de Tepalcatepec, Buena Vista y Huetamo en los días de simulación (27 de mayo al 01 de junio del 2018), pasa los 40°C, lo que coincide con el reporte emitido por CONAGUA. El municipio menos afectado en esas fechas fue Ario, con 31°C en el último día simulado.

Simulación de la temperatura en la Tierra Caliente del Estado de Michoacán,...

Una comparación de las temperaturas simuladas se presenta en la Figura 6, en la cual se aprecia el incremento positivo en la tendencia en todos los municipios.

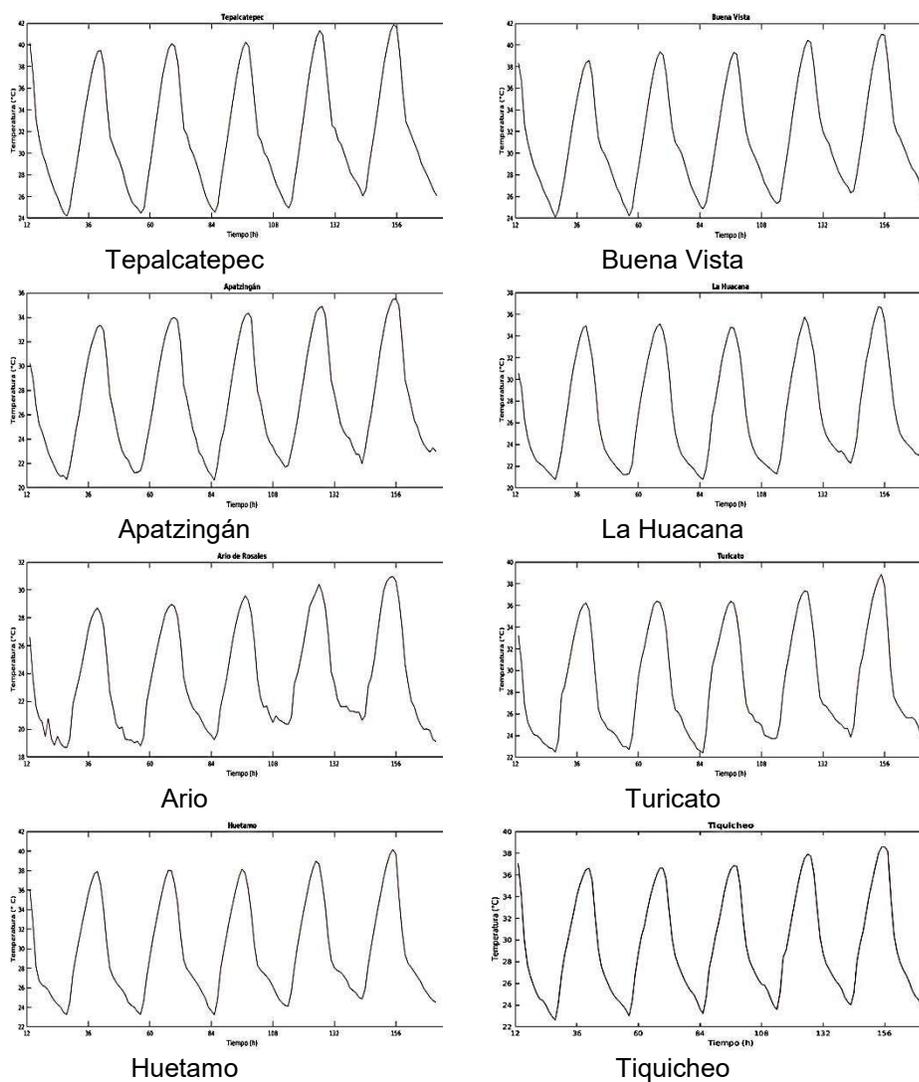


Figura 5. Evolución de la temperatura en los últimos días de mayo de 2018 en algunos municipios de Michoacán, en la Tierra Caliente

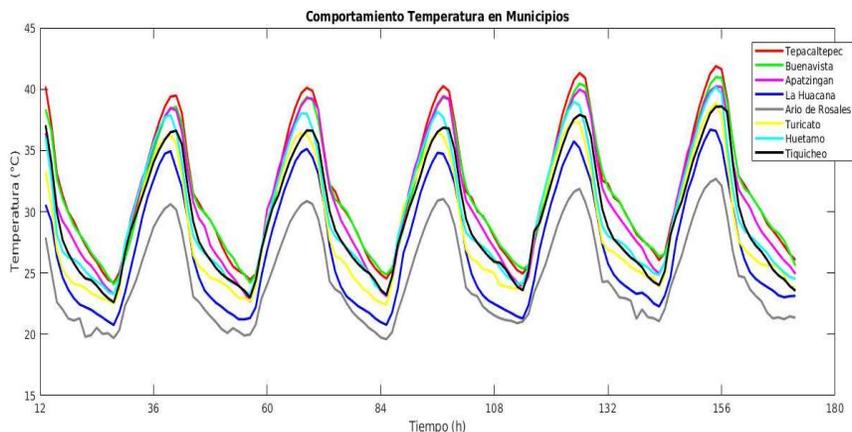


Figura 6. Representación de las temperaturas simuladas en los municipios de la Tierra Caliente en Michoacán.

Tomando como referencia los municipios anteriores, podemos generar una aproximación de la temperatura promedio en la zona, durante éste periodo. Ver Figura 7.

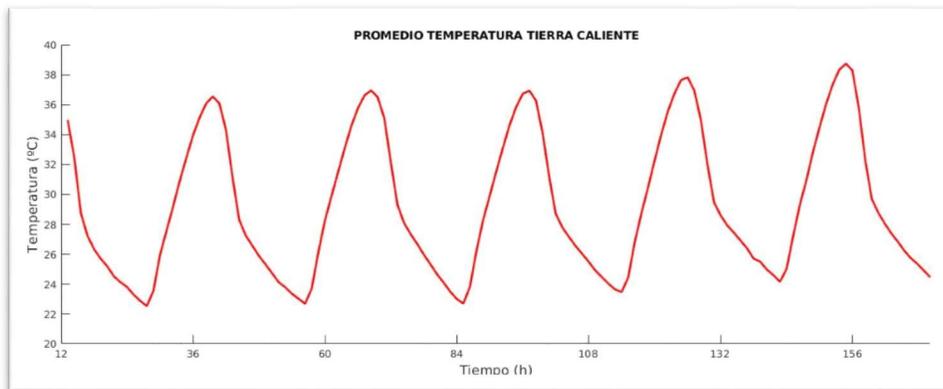


Figura 7. Temperatura promedio simulada con WRF en algunos municipios de Michoacán en el periodo del 27 de mayo a 01 de junio del 2018.

Se aprecia que el modelo reproduce de manera eficiente las temperaturas ocurridas en el periodo seleccionado, por lo que es una opción real para el pronóstico, no sólo

de la temperatura, sino de diferentes variables meteorológicas, además de una herramienta de prevención que debe ser utilizada en los medios de proyección civil en el estado.

Conclusiones

Cuando se habla de pronóstico del clima, lo que se espera es que el modelo precisamente se adelante a cualquiera de los fenómenos que se puedan presentar. Existen diversas variables que hacen que estos modelos sean más eficientes, sin embargo, requieren de poder de cómputo, software especializado y lenguajes de programación, así como del tiempo necesario para analizar a detalle, cada una de las variables climatológicas y darles una interpretación adecuada a los datos que se derivan de estos. Aunque los resultados presentados muestran un fenómeno ocurrido con anterioridad, este tipo de eventos climatológicos, se pueden predecir usando las herramientas que se han descrito en el presente trabajo, no sólo para la variable de temperatura, sino también para diversas variables como la precipitación, la humedad relativa, el viento y su dirección, etc. Lo anterior debe de promoverse en beneficio de la sociedad, en particular en el Estado de Michoacán, como una herramienta de prevención civil, como por ejemplo fenómenos tales como: sequías, inundaciones, huracanes entre otros, así como auxiliar de las estaciones meteorológicas instaladas al interior del estado, que no son sujetas de mantenimiento permanente y no todas ofrecen datos valiosos.

Referencias

- CONAGUA, 2018. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología Reporte del Clima en México Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. <http://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/R-C-Mayo18.pdf>.
- IPCC, 2019. Calentamiento global de 1.5°C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- SERMANAT, (2016). Cómo afecta el cambio climático a México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-afecta-el-cambio-climatico-a-mexico>.
- Yip, C. M. A., Gunturu, U. B. y Stenchikov, G. L., 2016. Wind resource characterization in the Arabian Peninsula. *Applied Energy* 164: 826–836.

- Simmons A., Uppala, S., Dee, D. y Kobayashi, S., 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter, 110, ECMWF, Reading, United Kingdom. 25–35.
- Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva., 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Saha S, et al., 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1010–1057.
- Mitch., 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of The American Meteorological Society - BULL AMER METEOROL SOC.*, 91.
- Skamarock, W.C., Klemp, J., Dudhia, Jimy, Gill, D.O., Barker, Dale, Wang, Wei y Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, 27, 3-27.
- Grell, Georg & Dudhia, Jimy y D.R.Stauffer., 1995. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Scientific Tech Note. NCAR/TN-398+STR, 138.
- Pielke, R. A., Cotton, W.R. y Walko, R.L., 1992. A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.* 49, 69–91.
- Zahra, J. y Berardi. U. 2020. Comparing urban canopy models for microclimate simulations in Weather Research and Forecasting Models. *Sustainable Cities and Society*, 55: 1020-1025.
- Le Roux, R., Katurji, M., Zawar-Reza, P., Quénoel y H., Sturman, A., 2019. Analysis of spatio-temporal bias of Weather Research and Forecasting temperatures based on weather pattern classification. *Int J Climatol.*, 39: 89–100.
- Kaniz, F. L., Kalam Mallik, M. A., Sajadul Alam, M., Abdun Naqib, J., Tanjila, I., Ahmad, I., Kaniz, F y Ahsan Khan, N., 2020. "Study on Heat Wave and its Thermodynamic features over Bangladesh using Numerical Weather Prediction Model (NWPM)," *International Journal of Science and Business, IJSAB International*, 4(6): 44-52.
- Thompson, G., Tewri, M., Ikeda, K., Tessorndorf, S., Weeks, C., Otkin, J. y Kong, F., 2019. Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in WRF high-resolution convective forecasts. *Atmospheric Research* 168: 92-104.

- Durán C., V., Sevilla P., F., Espinosa G., J.M, Borgonia A., O. y Gaytán L., S., 2003. Atlas geográfico del Estado de Michoacán. Secretaría de Educación del Estado de Michoacán. Segunda Edición.
- Clima Michoacán, 2020. Recuperado 10 de junio de 2020, de INEGI, <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/territorio/clima.aspx?tema=me&e=16>
- OMM y OMS publican orientaciones sobre los sistemas de aviso de olas de calor y de riesgos para la salud., 2020. Recuperado 10 de junio de 2020, de Organización Meteorológica Mundial, <https://public.wmo.int/es/media/news/omm-y-oms-publican-orientaciones-sobre-los-sistemas-de-aviso-de-olas-de-calor-y-de>
- Weather Research and Forecasting Model., 2020. Recuperado 10 de junio de 2020, de NCAR & UCAR website: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- Coiffier, J., 2011. Fundamentals of Numerical Weather Prediction. Cambridge University Press. 340 paginas, tapa dura. ISBN 9781107001039.
- El Universal, 2018. Por onda de calor, declaran emergencia extraordinaria en 34 municipios de Michoacán. Recuperado 10 de junio de 2020, <https://www.eluniversal.com.mx/estados/por-onda-de-calor-declaran-emergencia-extraordinaria-en-34-municipios-de-michoacan>.
- Guerrero, Á. M., García, E., Matellán, V., y Sánchez, J. L., 2013. Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL. Actas de las XXIII Jornadas de Paralelismo, 55 – 60.
- Montiel, J.C.G., 2016. Análisis Climático Global y Regional con modelos EdGCM-WRF, IPN-SEMAR. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. 35.
- Borrego, C., Monteiro, A., Ferreira, J., Miranda, A.I., Costa, A.M., Carvalho, A.C. y Lopes, M., 2008. Procedures for estimation of modelling uncertainty in air quality assessment. *Environ. Int.*, 34, 613–620.