

ARTICULO CIENTÍFICO

**Simulación numérica de parámetros físicos atmosféricos con el modelo WRF¹
para el análisis climático en el municipio de Tiquipaya (Bolivia).**

Numerical simulation of physical parameters in the atmosphere applying the WRF model to analyze the weather within Tiquipaya municipality (Bolivia).

Franz Pablo Antezana Lopez¹ , Giovana Silvia Cachaca Tapia^{2-a} , Valeria Coral Rodríguez García^{2-b}, Sergio Rodríguez Belmonte³ .

1. Ingeniero civil. Universidad de Beihang. Beijing, China. antezana@buaa.edu.cn
2. Asistentes de investigación. Universidad del Valle. Cochabamba, Bolivia. ag.cachacatapia@gmail.com, bvaleria.coral.rodriguez@gmail.com
3. Director del Departamento Académico de Ingeniería Civil. Universidad del Valle. Cochabamba, Bolivia. srodriguez@univalle.edu

RESUMEN

El comportamiento de los fenómenos naturales será estudiado a través de un modelo numérico, el cual permitirá un pronóstico del tiempo en sus variables atmosféricas para un futuro próximo a través de la visualización de gráficos especializados de diferentes variables meteorológicas: comportamiento del viento (velocidad y dirección), radiación, humedad y temperatura. El desarrollo del modelo numérico ayudará a simular el comportamiento climatológico de una región, basado en ecuaciones matemáticas que describirán el comportamiento de la atmósfera.

La información para verificar y ajustar el modelo numérico se obtuvo de la estación *in situ* de la Universidad Privada del Valle. Se realiza un ajuste visual a las curvas de las variables climatológicas simuladas respecto a las curvas registradas de temperatura, humedad,

¹ Weather Research and Forecasting Model (WRF).

radiación, velocidad y dirección del viento, con el objetivo de evaluar la efectividad y confiabilidad del modelo. La investigación concluye que el modelo ajustado es una herramienta que permitirá realizar un análisis regresivo y pronóstico a corto plazo de eventos extremos climatológicos que ocurren en el municipio de Tiquipaya. Dicho procedimiento servirá como un sistema de alerta temprana de factores climáticos.

Palabras clave: Análisis espacial. Atmósfera. Factores climáticos. Series temporales. Simulación numérica. WRF.

ABSTRACT

Behavior of natural phenomena will be studied through a numerical model, which will allow a weather forecast in its atmospheric variables for the near future. The meteorological variables analyzed were fourfold: wind behavior (speed and direction), radiation, humidity, and temperature. The development of the numerical model will help describe the behavior of a physical system based on mathematical equations that will describe the atmosphere's behavior.

The information to verify and adjust the numerical model was obtained from the *in-situ* station at Universidad Privada del Valle. A visual adjustment is made to the curves of the simulated climatological variables regarding the curves recorded for temperature, humidity, radiation, wind speed and direction, to evaluate the model effectiveness and reliability. The research concludes that the adjusted model is a tool that will allow a regressive analysis and short-term forecast of extreme climatological events that occur in the municipality of Tiquipaya. This procedure will serve as an early warning system for climatic factors.

Keywords: Atmosphere. Climatic factors. Numerical simulation. Spatial analysis. Temporal series. WRF.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio se basa en el uso de modelos numéricos que simulan los procesos físicos de la atmósfera, los cuales son necesarios no solo como la base para el diseño de estrategias de alerta de peligros climatológicos, sino también como una base de comparación para evaluar el modelo meteorológico que se desee estudiar (Moscoso *et al.*, 2015). El cambio climático es un fenómeno natural que altera los parámetros meteorológicos de la Tierra, perturbando directamente la calidad de vida de los ciudadanos presentes en las zonas afectadas (Duque & Montoya, 2021).

El modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) es capaz de realizar un pronóstico meteorológico a través de la predicción numérica del tiempo mediante simulaciones ideales y simulaciones reales (i.e., predicción numérica del tiempo real), empleando su diseño para la investigación y para aplicaciones operativas (WRF, 2017).

En la actualidad, el estudio de los parámetros meteorológicos asociados a los cambios climáticos y las consecuencias de eventos extremos, han generado incertidumbre a nivel mundial (Fernandez & Labra, 2020). Esto adquiere mayor relevancia en el municipio de Tiquipaya, debido a la presencia de sucesos extremos como deslizamientos, mazamorras e inundaciones, ocasionados por fuertes lluvias en la región (García *et al.*, 2021). Por tal razón, el objetivo de la presente investigación es obtener un pronóstico de eventos climatológicos realizando una comparación de los resultados de la simulación numérica con los datos extraídos de la estación meteorológica automática de la Universidad Privada del Valle.

Investigaciones recientes demostraron la necesidad de modelar con mayor precisión las variables meteorológicas (e.g., Boadh *et al.* 2016; Sathyanadh *et al.* 2017) y los estudios de mitigación de calor (Kadaverugu *et al.*, 2021*); puesto que, a partir de los resultados de estas variables, es posible generar registros de medición de emisiones de aerosoles y contaminantes antropogénicos.

2. METODOLOGÍA

En esta observación de parámetros físicos de la atmósfera se pretende analizar y evaluar el potencial del modelo WRF aplicado al área metropolitana de Cochabamba, específicamente, al municipio de Tiquipaya, ya que cada ensamblado de modelo depende de varios factores, como ser el área de estudio y la configuración del anidamiento que permite crear una sub-zona de estudio dentro de la que se está evaluando.

Adicionalmente, a esto se debe configurar los parámetros de entrada del modelo ya que este varía según la atmósfera y biosfera de la zona de estudio. Para configurar correctamente el modelo se debe prever de obtener la información estática de WPS disponible en https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html, el cual provee información de satélites que contienen datos como la clasificación e información topográfica del terreno, fracciones de arcilla y arena, fracciones de vegetación, entre otros.

Este tipo de parámetros contribuye como parámetro de entrada en la simulación, ya que la velocidad del viento y dirección se verán afectados por la geofoma del terreno, así como el índice de vegetación influirá en la temperatura de la atmósfera.

Finalmente, luego de la configuración inicial de la simulación y el procesado se comparó los resultados de la simulación en un rango de tiempo entre 23-09-2021 hasta el 28-10-2021 con la estación meteorológica automática de la Universidad del Valle y se evaluó la discrepancia de resultados.

A continuación, se presentan unas secciones que describen brevemente el modelo WRF y la configuración del anidamiento utilizando la herramienta WPS de la zona de estudio. Adicionalmente, se utiliza información de entrada de *National Operational Model Archive and Distribution System* (NOMADS) de la NOAA², el cual es un proyecto basado en servicios web que proporciona acceso a los datos de los modelos climáticos y meteorológicos tanto en tiempo real como en formato retrospectivo (Peckham *et. al.*, 2017).

² Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés).

La estación meteorológica automática de la Universidad Privada del Valle es de la marca HOBO y está localizada en el campus Tiquipaya. La estación registra las variables climatológicas de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, con una resolución temporal de cinco minutos. Las coordenadas de dicha estación son: latitud sur: 17°19'46,44'' y longitud oeste: 66°13'30,00'', zona 19K.

2.1. Modelo WRF

El modelo denominado WRF se caracteriza por simular el comportamiento meteorológico, así como pronosticar y analizar la calidad del aire en zonas de estudio a micro y meso escala, siendo desarrollado a partir de la colaboración de prestigiosos centros de investigación internacionales, entre ellos NCAR³ y NOAA (Michalakes *et al.*, 2002).

El modelo resuelve en una escala regional las ecuaciones dinámicas primitivas considerando la conservación de los flujos escalares y de masa a partir de condiciones iniciales y de contorno obtenidas de modelos de circulación global. Para ello cuenta con varias estructuras dinámicas y numerosas parametrizaciones físicas que permiten representar distintos procesos, permitiendo aplicarlo en diferentes escalas que van desde las decenas hasta los miles de kilómetros. De todas las opciones dinámicas, la versión en coordenadas de masa denominada *Advanced Research WRF* (ARW; Wang *et al.*, 2012) es la que presenta características ideales para realizar el modelado *on-line* de la química atmosférica (Véase Figura 1).

El modelo cuenta con dos núcleos dinámicos de operación, el *Advance Research WRF* (WRF-ARW) y el *WRF Non-hydrostatic Mesoscale Model* (WRF-NMM). El primer núcleo fue desarrollado y es mantenido actualmente por la *NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division* (NCAR-MMM), y el segundo núcleo fue desarrollado por la NOAA/NCEP (G. Rutledge, 2003), y la *Developmental Testbed Center* (DTC). El núcleo dinámico ARW, que ofrece más opciones en su configuración, que lo hace más versátil para ser utilizado alrededor del mundo (Dudhia J & Wang J., 2014).

³ Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés).

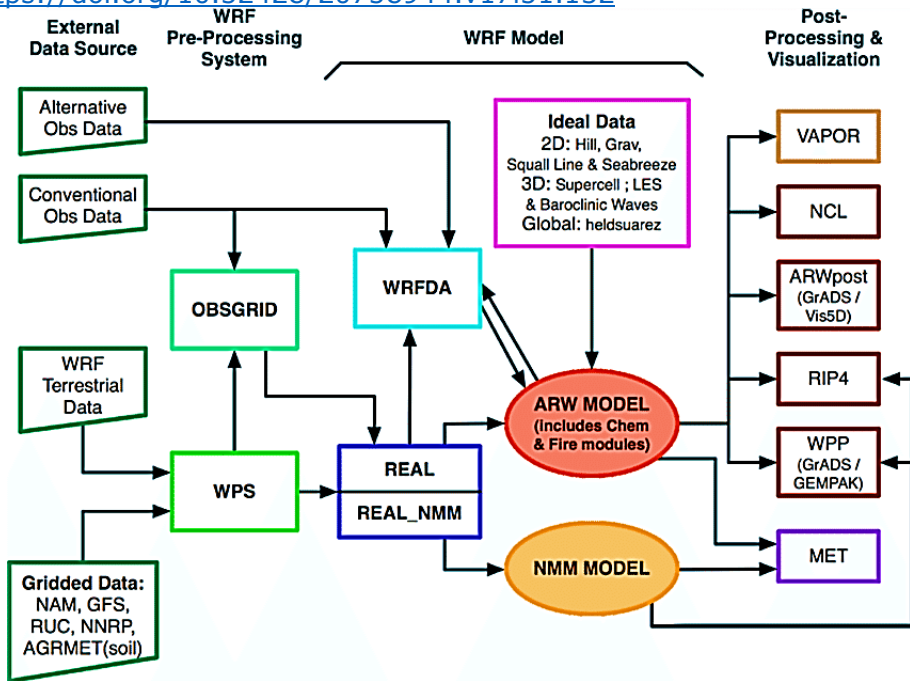


Figura 1. Modelo esquemático de WRF

Fuente: Wang et al., 2012.

2.2. Anidamiento de la zona de estudio

Algunas consideraciones son necesarias antes de seleccionar el área de estudio, ya que los resultados de salida finales varían entre sí, como son el área seleccionada y la relación de tamaño que deben tener los anidamientos descritos en la herramienta WPS como “d01, d02”, tal como se observa en la Figura 2. El área de estudio del dominio 2 es de 1 382 688,39 km². En este estudio se tomó en cuenta dicha recomendación, no obstante, es necesario realizar una evaluación a multiescalar para seleccionar los parámetros óptimos de simulación, ya que estos parámetros varían entre continentes y regiones.

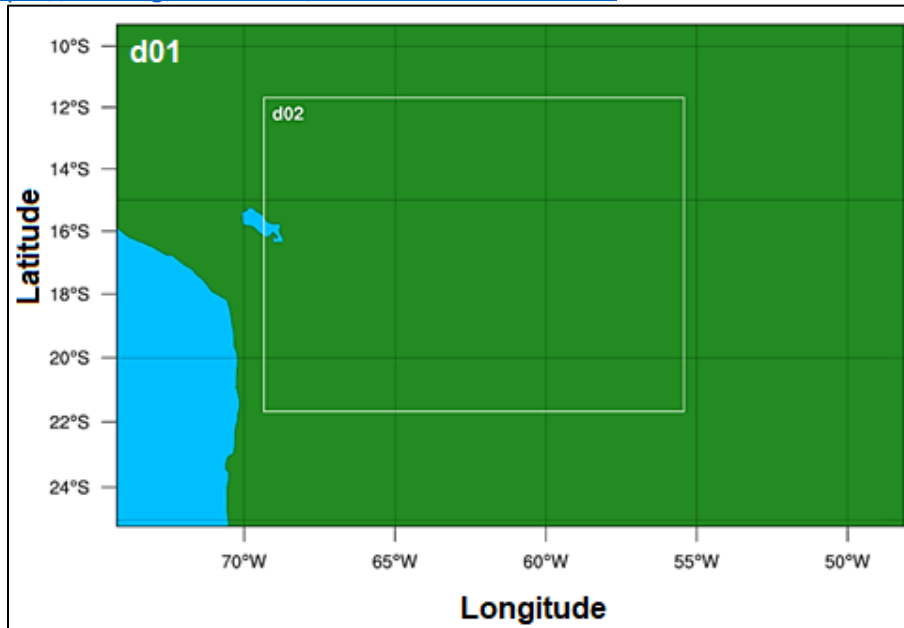


Figura 2. Anidamiento de la zona de estudio configurada con la herramienta WPS.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.3. Características de la simulación

Al finalizar el modelo se crea un archivo denominado “wrfout” el cual contiene los resultados descritos en la Tabla N° 1, los cuales pueden estar en 3-D (latitud, longitud, tiempo) o 4-D (latitud, longitud, tiempo, altura). Existen, además, herramientas de post procesamiento de resultados, pero específicamente para este estudio se utilizó la herramienta “ncdf4”, que es una librería de R, que nos permite procesar los resultados.

Nombre de la variable	Unidades	WRF variable
Temperatura medida a 2 metros del nivel de terreno	K	T2
Precipitación	mm	RAIN+RAINNC
Presión superficial	Pa	PSFC
Humedad específica medida a 2 metros del nivel de terreno	Kg/kg	Q2
Velocidad diaria del viento medida a 10 metros del nivel de terreno	m s-1	U10,V10
Nubosidad total (fracción)	% ^a	CLDFRA
Duración del sol	s	SWDOWN o SUNSHINE _{clwrf}
Radiación superficial SW descendente	W m-2	ACSWDNB
Flujo de calor latente ascendente en la superficie	W m-2	ACLHF
Flujo de calor sensible ascendente en la superficie	W m-2	ACHFX

Radiación de onda corta de superficie de afloramiento	W m ⁻²	ACSWUPB
Evaporación superficial	kg m ⁻² s ⁻¹	SFCEVP
Contenido de agua congelada en el suelo	m ^b	TSLB, SMOIS, SH2O
Escorrentía superficial	kg m ⁻² s ⁻¹	SFROFF
Escorrentía subterránea	kg m ⁻² s ⁻¹	UDROFF
Contenido de humedad total del suelo	kg m ⁻²	SMSTOT, DZS
Profundidad de la nieve	m	SNOWH
Derretimiento de la nieve	kg m ⁻² s ⁻¹	ACSNOM
Precipitación convectiva	kg m ⁻² s ⁻¹	RAINC
TOA radiación de onda larga saliente	W m ⁻²	ACLWUPT
TOA Radiación de onda corta incidente	W m ⁻²	ACSWDNT
TOA radiación de onda corta saliente	W m ⁻²	ACSWUPT
Componente del viento medido en U (dirección Este) a 10 metros del nivel de terreno	m s ⁻¹	U10, V10, SINA, COSA
Componente del viento medido en V (dirección Norte) a 10 metros del nivel de terreno	m s ⁻¹	U10, V10, SINA, COSA
Ráfaga de viento máxima medido a 10 m del nivel de terreno	m s ⁻¹	WINDGUSTMAX
Temperatura superficial	K	TSK
Espesor de la capa límite atmosférica	m	PBLH
Contenido de vapor en columna de agua	m ^b	QVAPOR, MU, MUB, DNW
Contenido de columna de agua líquida	m ^b	QCLOUD, MU, MUB, DNW
Contenido de vapor en columna de agua helada	m ^b	QICE, MU, MUB, DNW

Tabla 1. Variables climatológicas de salida (archivo “wrfout”).

Fuente: Wang et al.,2012.

Como parámetros iniciales de la simulación se utilizaron los valores *input* descritos en la Tabla 2. Es importante recalcar que estos parámetros fueron seleccionados tomando en cuenta las recomendaciones del manual de usuario de WRF y que estos no están calibrados con exactitud; es decir, que pueden existir otros parámetros óptimos para la simulación de la zona metropolitana de Cochabamba. No obstante, este estudio no está enfocado al análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada.

Parámetros de entrada (<i>physics</i>)	Dominio 1	Dominio 2
	Valor	Valor
mp_physics	4	2
progn	0	0
ra_lw_physics	1	1
ra_sw_physics	1	1
radt	30	10
sf_sfclay_physics	1	1
sf_surface_physics	2	2
bl_pbl_physics	1	1
bldt	1	1
cu_physics	5	5
cu_diag	1	1
cutd	1	1
isflx	1	1
ifsnow	1	1
icloud	1	1
surface_input_source	1	1
num_soil_layers	4	4
mp_zero_out	2	2
mp_zero_out_thresh	1e-8	1e-8
maxiens	1	1
maxens2	3	3
maxens3	16	16
ensdim	144	144
cu_rad_feedback	true	true

Tabla 2. Parámetros de entrada del modelo WRF (*physics*)

Fuente: Elaboración propia. 2021.

3. RESULTADOS

En esta sección se puede apreciar los resultados obtenidos mediante la simulación numérica y el contraste que tiene con lecturas de la estación meteorológica *in situ* de la Universidad del Valle. El rango de fecha que se simuló fue del 23 de septiembre al 2 de octubre del año 2021 y los resultados extraídos fueron del 23 de septiembre hasta el 29 de septiembre. Es importante mencionar que las resoluciones temporales son diferentes, ya que en el modelo los valores se registran cada 15 minutos mientras que en la estación meteorológica cada 5 minutos. Los parámetros físicos para analizar son la temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, humedad y radiación solar.

3.1. Variables físicas atmosféricas simuladas

3.1.1. Temperatura

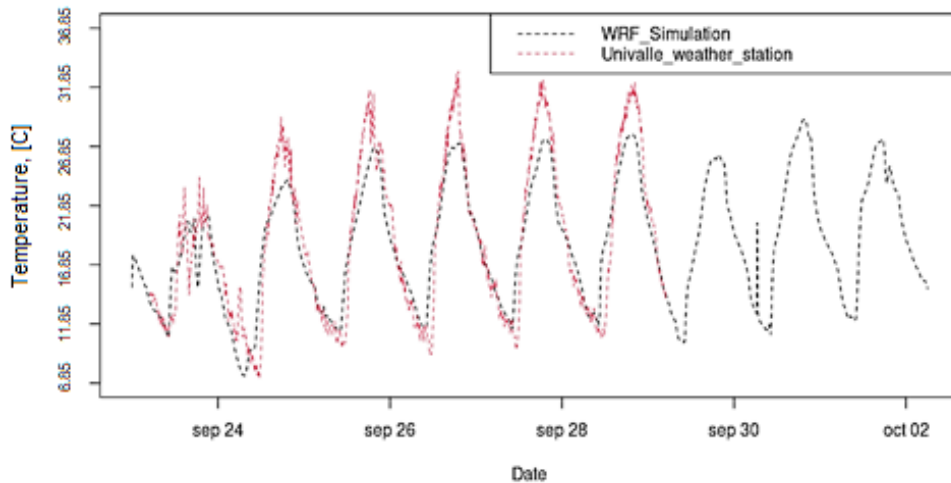


Figura 3. Comparación de resultados en series temporales de la temperatura (De 23-Sept-2021 a 02-Oct-2021).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Figura 3 se puede apreciar la diferencia entre el comportamiento de la temperatura realizada con la simulación numérica y los datos recolectados de la estación Univalle. Si bien ambos comportamientos son similares, también presentan pequeñas variaciones, como son los máximos valores alcanzados cada día, con picos más elevados en los datos recolectados de la estación respecto a la simulación, con diferencias de 5 kelvin aproximadamente. Así también, el día 24 de septiembre se registró un valor de temperatura mínimo horas antes de la obtenida en el registro meteorológico, pero ambos muestran valores mínimos de temperatura similares.

3.1.2. Viento

El comportamiento del viento es analizado en un rango de tiempo menor a la evaluación de los otros parámetros con el fin de estimar el potencial de la simulación en rangos de tiempo mucho menores, por lo que la velocidad y dirección de viento fueron analizados el 28 de septiembre desde las 16:00:00 hasta las 18:00:00 horas, por ser un horario en el que se registran valores extremos de fuerza del viento en el municipio de Tiquipaya.

La obtención de datos del viento puede presentar errores, lo cual indica que los valores pronosticados, pueden ser mayores o menores que los observados, lo que significa que, a pesar de que el pronóstico presente valores próximos a los reales, estos no representan una tendencia del comportamiento real del parámetro analizado (Verde, 2015).

3.1.2.1. Velocidad

Las variaciones que tiene el viento entre la simulación y la estación meteorológica son pequeñas. Como un valor promedio, el viento presenta una velocidad de 3 m/s aproximadamente (véase Figura N° 4), según los registros de la estación, existiendo picos altos que no fueron registrados en el modelo. En el archivo de salida ‘wrfout’, la velocidad del viento es extraída de la variable V10.

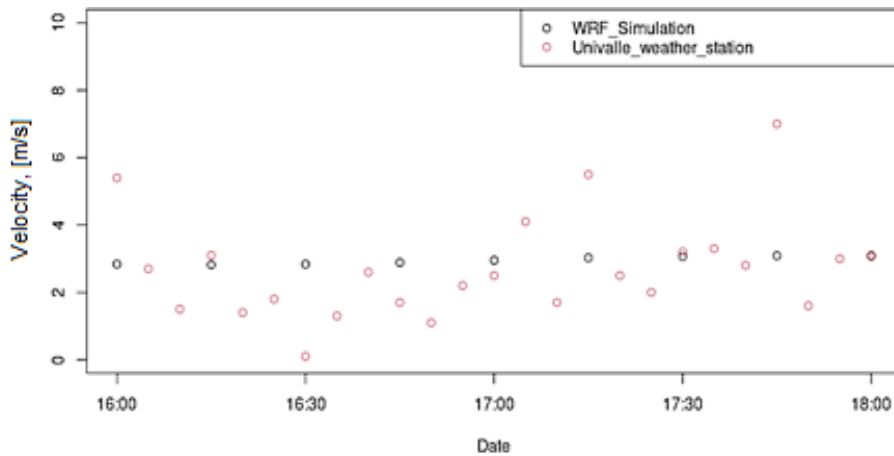


Figura 4. Comparación en series temporales de la velocidad del viento (24-09-2021 16:00:00 a 18:00:00).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.2.2. Dirección

Para el cálculo de la dirección del viento se extraen dos variables del archivo “wrfout”. Una es la dirección del viento en el eje ‘x’ y otra en el eje ‘y’, que poseen el nombre de U y V. Es importante tomar en cuenta que estas variables corresponden a resultados en 4-D (latitud, longitud, altura y tiempo). Como se puede observar en la Figura 5, la dirección del viento en la simulación y en los registros de la estación Univalle son similares, indicando un azimut de 200 grados, aproximadamente.

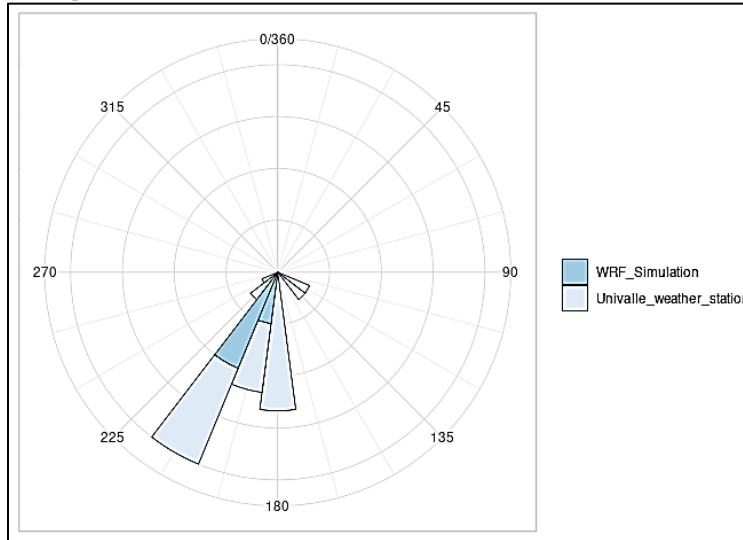


Figura 5. Series temporales de la dirección del viento (24-09-2021 16:00:00 a 18:00:00 horas).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.3. Humedad

La variable de la humedad relativa es analizada en este punto. Es importante recalcar que dicho valor de humedad no es posible obtenerlo en la simulación, al menos con la información de entrada proporcionada por NOMADS. Sin embargo, se puede calcular dicho parámetro según la relación mostrada en la Ecuación 1, que depende de la presión superficial del terreno (PSFC), de la humedad específica (Q2) y la temperatura (T2). Los resultados contrastados tienen bastante similitud con respecto a los registros de la estación meteorológica de Univalle, cuya comparación se puede apreciar en la Figura 6.

$$RH := \frac{HS \cdot 100}{\frac{379.90}{P} \cdot e^{17.27 \cdot \frac{T - 273.16}{T - 35.86}}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

RH: Humedad relativa, [%]

HS: Humedad específica, [kg/kg]

P: Presión, [atm]

T: Temperatura, [Kelvin]

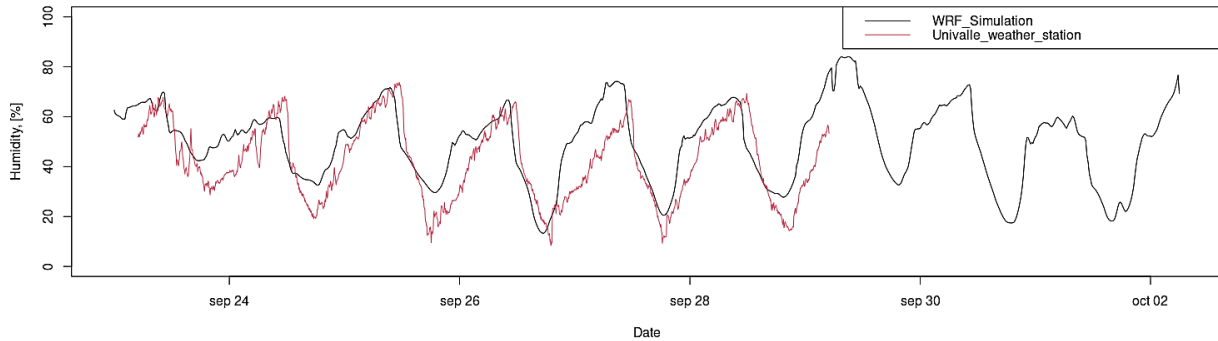


Figura 6. Comparación de resultados en series temporales de la humedad del ambiente (23-09-2021 a 02-10-2021)

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.4. Radiación

Inicialmente, se describen los modelos paramétricos de cielo claro que estiman la radiación mediante un estado atmosférico teórico, que se define a través de parámetros atmosféricos o información meteorológica disponible. Los valores de radiación solar alcanzan su pico aproximadamente a las 14:00:00 horas de cada día, para luego ir descendiendo en la simulación y en los registros de la estación meteorológica, hasta alcanzar aproximadamente valores de radiación solar de cero en las noches.

La Figura 7 muestra que los resultados de la simulación están por encima de los registros, aunque con una variación baja, ya que se puede observar que se tiene un comportamiento periódico que no presenta picos máximos ni mínimos. Por su parte, los registros meteorológicos de la estación Univalle tienen lecturas en las que existe incremento o decremento diferente a la media que es 1100 aproximadamente.

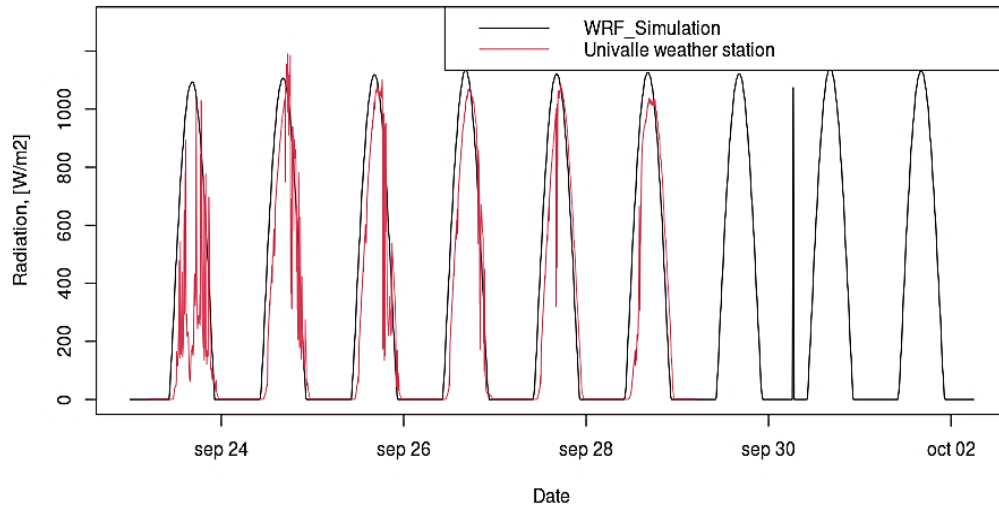


Figura 7. Comparación de resultados en series temporales de la radiación (23-09-2021 a 02-10-2021).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.1.5. Precipitación

Para el cálculo de precipitación total, se recomienda sumar los parámetros *OUTPUT* que se muestran en la fórmula 2 obtenidos con el modelo WRF, en caso de analizar el factor de la nevada en nuestro análisis, es necesario añadir la variable *RAINSH* a la precipitación total.

$$TOTAL\ PRECIPITATION = RAINC + RAINNC \dots\dots\dots (2)$$

Donde,

RAINC : Precipitación total acumulada de cúmulos, [mm]

RAINNC : Precipitación total acumulada a escala de la red, [mm]

Asimismo, es posible apreciar una comparación de series temporales de precipitación en la Figura 8 a continuación:

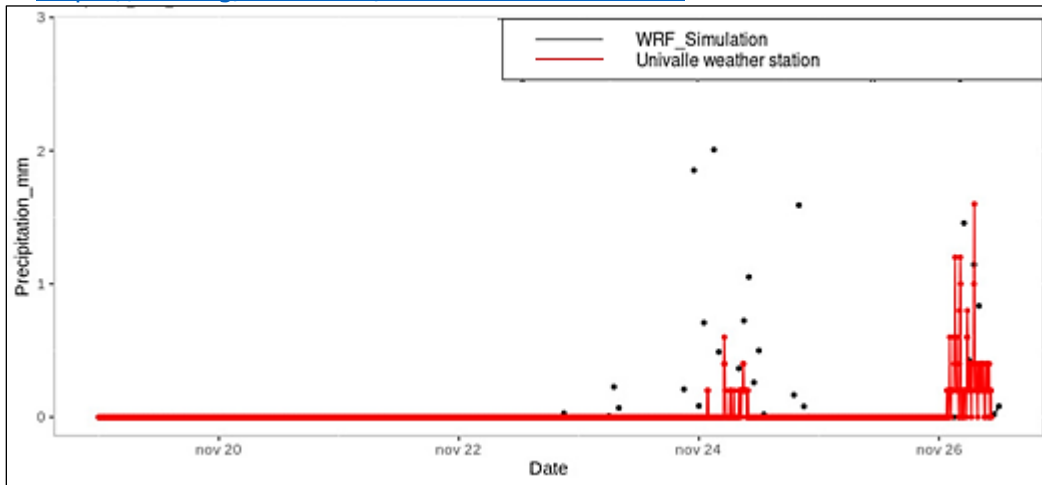


Figura 8. Resultados en series temporales de la precipitación (19-11-2021 a 26-11-2021)

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4. DISCUSIÓN

Al hacer simulaciones de parámetros físicos atmosféricos, horarios hasta semanales, las Figuras 3, 4, 5, 6, 7, y 8 de las medidas en el punto de validación que corresponde a la “Estación meteorológica UNIVALLE” muestran que el modelo logra reproducir significativamente el comportamiento horario de las temperaturas a dos metros de la superficie, por lo que el grado de correlación entre simulaciones y valores reales es altamente significativo. En la Figura 9 se muestra un resumen de los resultados del mapeo de variables climáticas empleando el modelo WRF. Cabe recalcar que el modelo logra resultados a una resolución temporal desde un minuto.

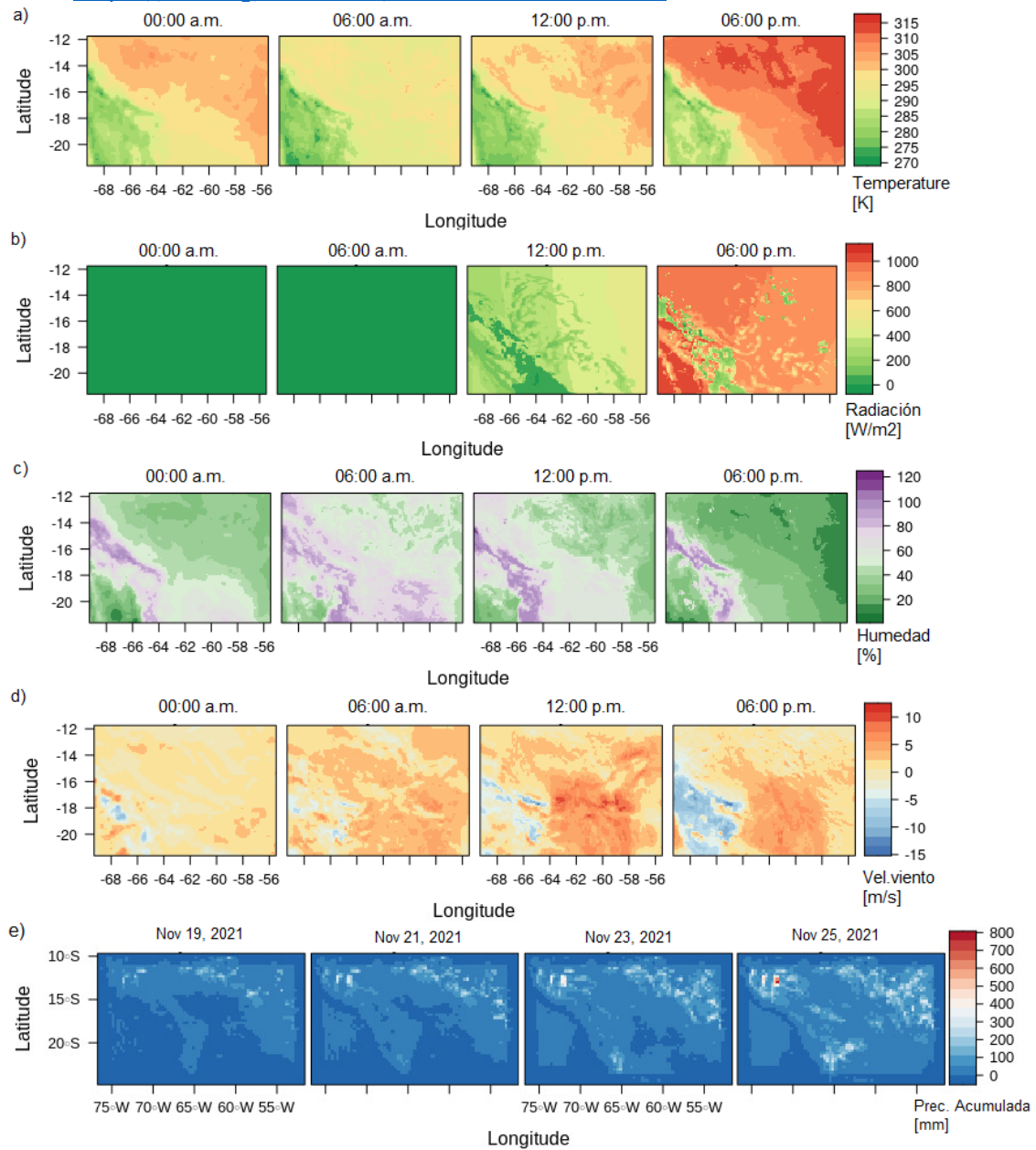


Figura 9. Mapeo de parámetros climáticos obtenidos del modelo WRF (Fecha: 23/09/2021). a) Temperatura, b) Radiación, c) Humedad, d) Velocidad del viento, e) Precipitación acumulada 19-25 Nov 2021.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los resultados obtenidos según las parametrizaciones y configuraciones utilizadas en el estudio concluyen que el modelo WRF se comportó mejor en la simulación de las variables termodinámicas (T y RH) de la misma manera que en diferentes estudios similares realizados

por Kadaverugu *et al.* (2021) y Casallas *et al.* (2020). Este último realizó un estudio de calidad de aire analizando las variables climáticas físicas y químicas en Bogotá, Colombia, que corresponde a un estudio muy cercano al área de estudio localizado en Bolivia.

4.1. Comparación de resultados

La validación del modelado se realiza mediante un estudio de comparación de resultados de R^2 . La definición más común de este parámetro se refiere a la regresión lineal. El coeficiente R^2 es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, lo cual es sólo cierto para la regresión lineal simple. El coeficiente de determinación resulta del cuadrado del coeficiente de determinación múltiple. En ambos casos el R^2 adquiere valores entre 0 y 1. Existen casos dentro de la definición computacional de R^2 donde este valor puede tomar valores negativos (Colin, 1997).

En este caso se tienen diferentes resultados de comparación del coeficiente R^2 , el cual se obtuvo comparando los resultados obtenidos con el modelo WRF y con la estación meteorológica HOBO, ambos grupos de datos fueron promediados por hora, los resultados están expuestos en la Figura 10, la cual muestra un valor de $R^2=0.6342$ para los datos de precipitación, como se puede ver en esta comparación no se obtuvo muchos puntos de comparación debido al rango de tiempo de este estudio. Por otra parte, en los análisis en los que se tuvo bastantes puntos para comparar que fueron la Temperatura, Radiación y humedad relativa, se obtuvieron valores de R^2 de 0,7782; 0,962; 0,6701, respectivamente.

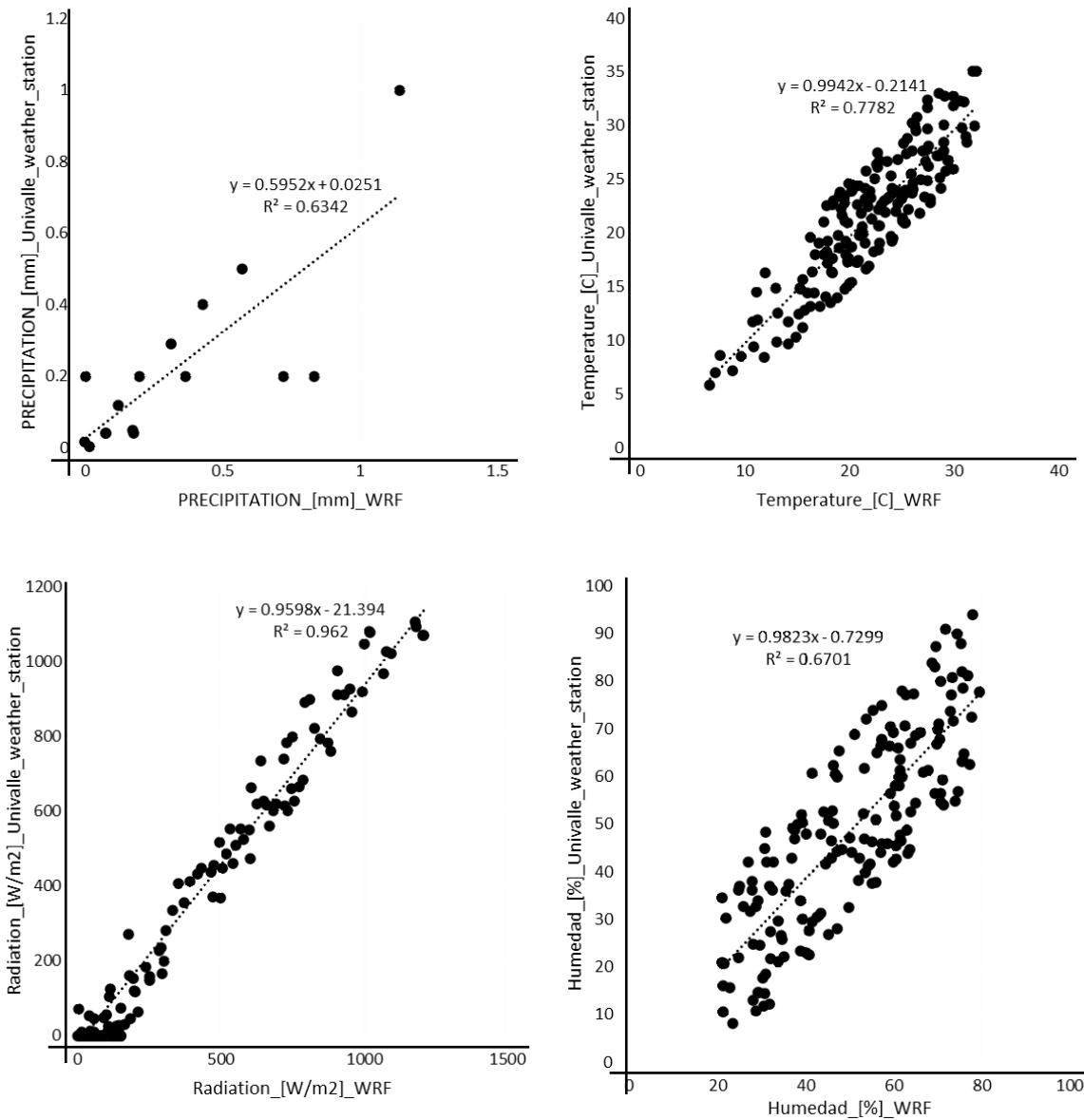


Figura 10. Análisis de regresión con datos de la estación meteorológica HOBO, Univalle con el modelo WRF.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5. CONCLUSIONES

La escasez de información usualmente limita los proyectos relacionados con el clima en Bolivia. Una solución factible para el análisis temporal a micro y meso escala de los parámetros físicos de la atmósfera es la simulación numérica empleando modelos como el CMAQ⁴ o WRF.

Para futuros estudios se debe considerar un análisis de calidad del aire para estudiar el comportamiento en toda la atmósfera de Bolivia con respecto a los agentes físicos y químicos, analizando las zonas que emiten mayor concentración de contaminantes antropogénicos y biogénicos. Por otra parte, el análisis de la precipitación fue obviada en este estudio, debido a los bajos valores de dicho parámetro en el rango de tiempo de estudio. Para futuros análisis, se pretende estudiar la precipitación en épocas de lluvia intensa que corresponden al rango de meses de octubre a marzo, según el sistema de clasificación bioclimática mundial.

La Figura N° 9 muestra los resultados en cambio temporal de la simulación numérica de parámetros climáticos dentro del área de estudio, por lo que podemos concluir que el potencial de simular variables climáticas con la herramienta WRF es bastante útil, ya que se puede estimar el comportamiento atmosférico en un área remota sin necesidad de instalar una estación meteorológica y tener resultados a una resolución espacial y temporal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen los esfuerzos de NOMADS que trabaja en la base de datos para simular los parámetros atmosféricos, que fue utilizada como información de entrada para la simulación numérica. También agradecen a la Universidad del Valle por permitir usar la información de la estación meteorológica dentro el campus y el apoyo de los miembros de la Sociedad Científica de Estudiantes de Ingeniería Civil - Univalle.

⁴ Modelo Comunitario Multi-escala de Calidad del Aire (CMAQ, por sus siglas en inglés).

REFERENCIAS

- Anusha Sathyanadh, Thara V. Prabha, B. Balaji, E.A. Resmi, Anandakumar Karipot, Evaluation of WRF PBL parameterization schemes against direct observations during a dry event over the Ganges valley, *Atmospheric Research*, Volume 193, 2017, Pages 125-141, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.016>.
- Casallas, A., Celis, N., Ferro, C., Barrera, E. L., Peña, C., Corredor, J., & Segura, M. B. (2020). Validation of PM₁₀ and PM_{2.5} early alert in Bogotá, Colombia, through the modeling software WRF-CHEM. *Environmental Science and Pollution Research*, (27), 35930-35940. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06997-9>
- Colin Cameron, A.; Windmeijer, Frank A.G.; Gramajo, H; Cane, DE; Khosla, C (1997). An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. *Journal of Econometrics* 77 (2): páginas329-342.ISSN:0304-4076. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(96\)01818-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(96)01818-0)
- Dudhia, J. and Wang, J. (2014) WRF Advanced Usage and Best Practices. 16th WRF Annual Workshop, Boulder, June 2014. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2014/ppts/best_prac_wrf.pdf
- Duque Franco, Isabel, & Montoya Garay, Jhon Williams. (2021). Cambio climático y urbanización. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 274-279. Epub August 27, 2021. Retrieved December 03, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2021000200274&lng=en&tlng=es.
- Fernandez, L. & Labra, R. (2020). *Estaciones meteorológicas: su importancia en la decisión de cuánto regar* [Webinar]. Academia de riego KILIMO. <https://academiaderiego.kilimoagtech.com/decargar-webinar-estaciones-meteorol%C3%B3gicas>
- García F., Willman, Delfín S., Mirko, Ledezma P., Mauricio, & Arévalo S., Boris. (2021). Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba. *Acta Nova*, 10(1), 61-95. Recuperado en 03 de diciembre de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892021000100005&lng=es&tlng=es.
- Kadaverugu, R., Gurav, C., Rai, A. *et al.* Quantification of heat mitigation by urban green spaces using InVEST model—a scenario analysis of Nagpur City, India. *Arab J Geosci* 14, 82 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06380-w>.

Kadaverugu, R., Matli, C. & Biniwale, R. Suitability of WRF model for simulating meteorological variables in rural, semi-urban and urban environments of Central India. *Meteorol Atmos Phys* **133**, 1379–1393 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00816-y>

Michalakes John, Loft Richard, Bourgeois A. (2002). Performance-Portability and The Weather Research and Forecast Model, website:

https://www.researchgate.net/publication/2859247_Performance-Portability_And_The_Weather_Research_And_Forecast_Model

Moscoso-Vanegas, Diana Lucía, Vázquez-Freire, Verónica Eulalia, & Astudillo-Alemán, Ana Lucía. (2015). Modelamiento de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca-Ecuador. *Iteckne*, *12*(2), 188-197. Retrieved December 03, 2021, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982015000200010&lng=en&tlng=es.

Peckham, S. E., Grell, G., McKeen, S. A., Ahmadov, R., Wong, K. Y., Barth, M., ... & Freitas, S. R. (2017), WRF-Chem version 3.8. 1 user's guide, NOAA Technical memorandum OAR GSD(48), <http://doi.org/10.7289/V5/TM-OAR-GSD-48>

Rahul Boadh, A.N.V. Satyanarayana, T.V.B.P.S. Rama Krishna, Srikanth Madala, Sensitivity of PBL schemes of the WRF-ARW model in simulating the boundary layer flow parameters for their application to air pollution dispersion modeling over a tropical station, *Atmósfera*, Volume 29, Issue 1, 2016, Pages 61-81, ISSN 0187-6236, <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.01.05>.

Rutledge, G.K., J. Alpert, R. J. Stouffer and B. Lawrence, (2003), [The NOAA National Operational Model Archive and Distribution System \(NOMADS\)](#), Realizing TeraComputing: Proceedings of the Tenth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology (November 2002), W. Zwiefelhofer and N. Kreitz, Eds., World Scientific, pp. 106–129,

Verde, A. V., Rodríguez, R. C. C., & Rodríguez, A. R. (2015). Evaluación del pronóstico de viento del modelo Weather Research Forecast (WRF) en torres de prospección eólica. *Revista Cubana de Meteorología*, Volumen 21 Número 2, 16-28. ISSN: 266-4-0880. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/410>

Wang, W., Bruy`ere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H.-C., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J.: ARW Version 3 Modeling System User's Guide (2012). National Center of Atmospheric Research. Website: <https://www.yumpu.com/en/document/read/6710200/wrf-arw-users-guide-mmm-ucar>

WRF. (2017), de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, website: <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf>

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2021 Franz Pablo Antezana Lopez, Giovana Silvia Cachaca Tapia, Valeria Coral Rodríguez García, Sergio Rodríguez Belmonte.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)