

Revista Cubana de
Ciencias Forestales





CFORES

Volumen 12, número 1; 2024

Datos espaciales integrados a modelo numérico para análisis meteorológico y del clima local en montañas de Cuba

Spatial data integrated into numerical model for analysis meteorological and local climate in mountains of Cuba

Dados espaciais integrados a um modelo numérico para análise meteorológica e climática local nas montanhas de Cuba

Arisleidys Peña de la Cruz^{1*} , Ricardo Delgado-Téllez² , Yusmira Savón-Vaciano¹ ,
Carlos Alberto Miranda Sierra³ 

¹Instituto de Meteorología (INSMET). La Habana, Cuba.

²Centro de Desarrollo de la Montaña, Guantánamo, Cuba.

*Autor para la correspondencia: aris.delacruz@gtm.insmet.cu

Recibido: 30/10/2023.

Aprobado: 31/10/2024.



RESUMEN

La modelación del tiempo y el clima a escala local en las montañas han sido relevantes para el estudio de los ecosistemas agroforestales y su evolución futura. El trabajo tuvo como objetivo integrar un conjunto de datos espaciales de alta resolución al modelo numérico de predicción e investigación meteorológica WRF, adecuado para el análisis meteorológico y del clima local en las montañas de Cuba. En el trabajo, se definió como datos espaciales prioritarios los referidos al relieve, la máscara de tierra como interface océano-suelo, el tipo de cobertura y tipo de suelo. Se seleccionaron las bases de datos espaciales de alta resolución nacionales o globales de mejor calidad y más adecuadas a las características del modelo. Las bases de datos integradas al WRF tuvieron resolución espacial entre 0,95 y 0,03 km aproximadamente en el Ecuador. El incremento y actualización de los datos espaciales robustecieron la capacidad del modelo para el análisis de los factores geográficos formadores del clima local, propiciando mejor desempeño en las montañas. Los resultados de la investigación pudieran contribuir a la vigilancia y pronóstico meteorológico y climático a escala local para las montañas de Cuba. De igual manera, beneficiarían los estudios y gestión de riesgos asociados a incendios forestales, eventos hidrometeorológicos severos, la variabilidad climática, el cambio climático, y otros peligros relacionados con el sistema climático que han afectado los ecosistemas agroforestales cubanos.

Palabra clave: modelos numéricos meteorológicos, topoclimas, ecosistemas agroforestales.

ABSTRACT

Local-scale weather and climate modeling in mountains has been relevant for the study of agroforestry ecosystems and their future evolution. The study aimed to integrate a set of high-resolution spatial data to the WRF numerical meteorological prediction and research model, suitable for meteorological and local climate analysis in the mountains of Cuba. In the study, priority spatial data were defined as those referring to the relief, the land mask as the ocean-soil interface, the type of cover and type of soil. The national or global high-resolution spatial databases of the best quality and most appropriate to the characteristics



of the model were selected. The databases integrated into the WRF had spatial resolution between approximately 0.95 and 0.03 km in Ecuador. The increase and updating of spatial data strengthened the model's capacity for the analysis of the geographic factors that shape the local climate, promoting better performance in the mountains. The research results could contribute to meteorological and climate monitoring and forecasting at a local scale for the mountains of Cuba. Likewise, studies and risk management associated with forest fires, severe hydrometeorological events, climate variability, climate change, and other dangers related to the climate system that have affected Cuban agroforestry ecosystems would benefit.

Keyword: numerical meteorological models, topoclimates, agroforestry ecosystems.

RESUMO

A modelagem do tempo e do clima em escala local nas montanhas tem sido relevante para o estudo dos ecossistemas agroflorestais e sua evolução futura. O objetivo deste trabalho foi integrar um conjunto de dados espaciais de alta resolução ao modelo numérico de pesquisa e previsão do tempo WRF, adequado para a análise do tempo e do clima local nas montanhas de Cuba. No trabalho, os dados espaciais prioritários foram definidos como aqueles referentes ao relevo, à máscara de terra como uma interface oceano-solo, ao tipo de cobertura e ao tipo de solo. Foram selecionados os bancos de dados espaciais nacionais ou globais de alta resolução da mais alta qualidade e mais adequados às características do modelo. Os bancos de dados integrados ao WRF tinham resolução espacial entre 0,95 e 0,03 km aproximadamente no equador. Os dados espaciais ampliados e atualizados fortaleceram a capacidade do modelo de analisar os fatores geográficos que moldam o clima local, levando a um melhor desempenho nas montanhas. Os resultados da pesquisa podem contribuir para o monitoramento e a previsão do tempo e do clima em escala local nas montanhas de Cuba. Eles também beneficiariam estudos e gerenciamento de riscos associados a incêndios florestais, eventos hidrometeorológicos graves, variabilidade climática, mudanças climáticas e outros perigos relacionados ao sistema climático que afetaram os ecossistemas agroflorestais cubanos.



Palavra-chave: modelos meteorológicos numéricos, topoclimas, ecosistemas agroforestais.

INTRODUCCIÓN

En Declaración de las Naciones Unidas se reconoce la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas de las montañas y los servicios que estos proporcionan, esenciales en la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible. En Cuba, la estrategia de implementación del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social al 2030 se realiza con la visión de enfrentamiento al cambio climático. En correspondencia, se implementa el Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático, "*Tarea Vida*", donde se especifica la necesidad de análisis a escala local. Los servicios ecosistémicos agroforestales en Cuba están fuertemente vinculados al comportamiento meteorológico y climático a escala local en las montañas, los topoclimas (Molina-Pelegrín *et al.*, 2021; Zamora Fernández, Azanza Ricardo y Bezanilla Morlot 2022). Estos servicios son susceptibles a los incendios forestales, los eventos hidrometeorológicos severos, a la variabilidad y el cambio climático, entre otros peligros asociados con el comportamiento del tiempo y el clima (Zamora Fernández y Azanza Ricardo 2020; Hardy Casado *et al.*, 2021; Posphehov *et al.*, 2023). Este vínculo implica, además, impactos en los balances macroeconómicos y los medios de vida de los montañeses.

En los últimos años, se han producido avances en metodologías y servicios para la vigilancia meteorológica y climática en la Mayor de las Antillas (Delgado-Téllez y Peña-de la Cruz 2019; Centella-Artola *et al.*, 2023; Peña-de la Cruz *et al.*, 2023; Torres y Lorenzo 2023). De igual manera, estos avances se aprecian dentro de las proyecciones del clima futuro a escala espacial favorable a la evaluación de los impactos y estrategias de adaptación al cambio climático (Centella-Artola *et al.*, 2020; Vichot-Llano *et al.*, 2021). Sin embargo, la vigilancia y el pronóstico meteorológico y climático, análogamente con la proyección futura de los topoclimas, aún son insuficientes para la gestión de los servicios ecosistémicos agroforestales en Cuba. La generalidad de las limitaciones de los sistemas de vigilancia y pronóstico del tiempo y el clima para las montañas a escala local, están relacionados con el



bajo desempeño de las metodologías y herramientas en la representación de los procesos físicos y dinámicos involucrados.

El modelo numérico meteorológico de predicción e investigación del tiempo, WRF por sus siglas en idioma inglés (NCAR 2018) es una de las herramientas más usadas en los estudios del tiempo y el clima a escala regional y local (Afrizal y Surussavadee 2018; Wang *et al.*, 2020). Una de las razones se atribuye a que el software y los datos de frontera para su uso están disponibles globalmente para la comunidad científica. Otras razones para sus múltiples aplicaciones es la flexibilidad de su arquitectura y su precisión. La distribución oficial del WRF se suministra con un sistema de preprocesamiento (WPS por sus siglas en idioma inglés) y un conjunto de variables geográficas como relieve, localización de las masas terrestres, hidrología, tipos y usos del suelo, a modo de condiciones de frontera estáticas. Estas variables a escala global tienen resolución espacial de 10 minutos, 5 minutos y 30 arcosegundos, aproximadamente 18,5 km, 9,25 km y 0,95 km respectivamente en el Ecuador. Esta resolución espacial es oportuna para su propósito fundamental de análisis a mesoescala. No obstante, cuando se utiliza el WRF en escalas mayores, por ejemplo, aplicaciones asociadas al análisis de los topoclimas para los servicios ecosistémico agroforestales en las montañas, las condiciones de frontera suministradas con el software no pueden, por lo general, resolver los fenómenos locales. En estos casos se requiere la inclusión de datos ajustados a la escala de modelación definida.

Esta investigación tiene como objetivo integrar un conjunto de datos espaciales de alta resolución disponibles, como bases de datos de frontera del WRF, adecuado para el análisis meteorológico y del clima local en las montañas de Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó para todo el archipiélago cubano, ubicado a 74° 08', 84° 58' longitud Oeste y 23° 17', 19° 50' latitud Norte, un área total de 109,886 km² (Figura 1).



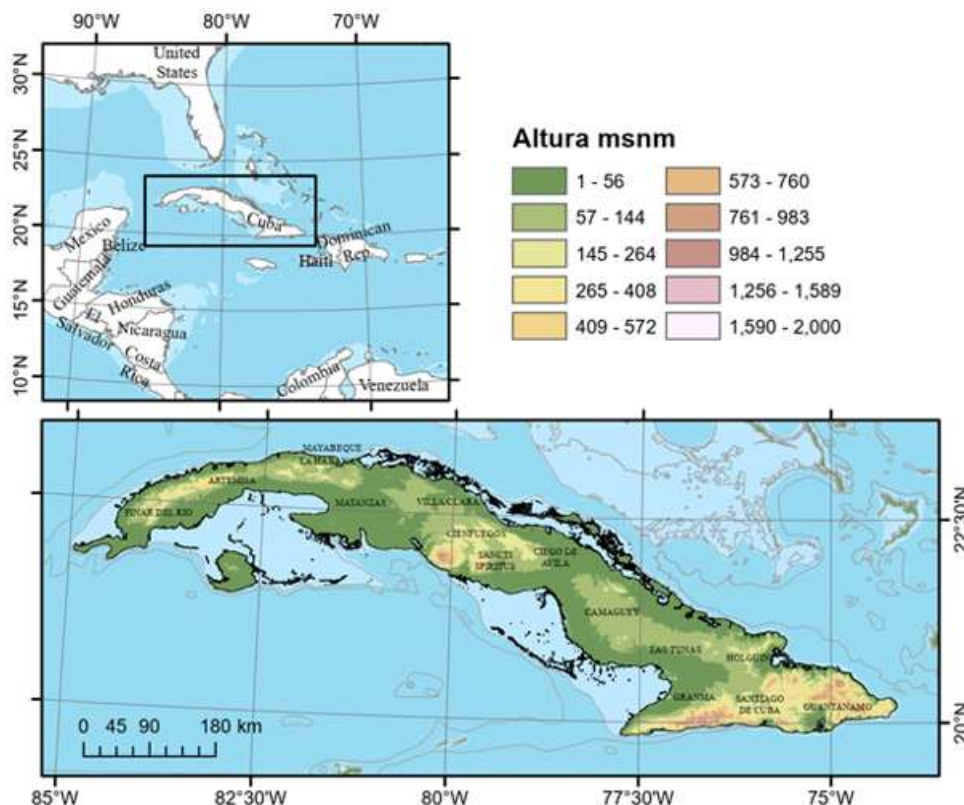


Fig. 1. - Área de estudio: Archipiélago de Cuba

En el estudio, se utilizó el WRF, modelo no hidrostático de mesoescala, en la versión v4.5. En el trabajo, se definió como datos mínimos de frontera estática el relieve, la máscara de tierra (interface océano-suelo), el tipo de cobertura y tipo de suelo. Estos parámetros son procesados por el subsistema de preprocesamiento (WPS) del modelo. Se utilizaron bases de datos nacionales y globales según su disponibilidad y calidad. Se priorizaron las bases de datos espaciales con referencias en revistas científicas. En el caso de los datos nacionales no publicados formalmente, fueron utilizadas las versiones oficiales de los organismos responsables en el país. Se seleccionaron las bases de datos espaciales de alta resolución de mejor calidad y más apropiada a las características del WRF.

La investigación usó las siguientes bases de datos nacionales:



- El Catastro Nacional de la República de Cuba, escala 1:10 000 del Departamento de Proyectos de Planificación Física, 2018.
- El Mapa de Cobertura Forestal Nacional, escala 1:100 000 del Servicio Estatal Forestal, elaborado por Estrada y colaboradores en 2012.
- El Mapa Genético de los Suelos de Cuba, escala 1:250 000, de Hernández Jiménez y colaboradores, Academia de Ciencias, 1971.

La definición de la máscara de tierra tiene como objetivo que las ecuaciones del WRF puedan diferenciar la superficie oceánica de la superficie terrestre. La máscara de tierra se generó en forma de mapa binario (1 = superficie terrestre, 0 = superficie marina) con 1 segundo de arco de resolución espacial. Para definir la zona terrestre se utilizó el Catastro Nacional que sirve como base para el Balance Nacional de Suelo. Esta máscara inicial fue complementada con los datos del modelo digital de superficie (DSM) para reflejar las tierras emergidas no recogidas del territorio nacional, generalmente pequeños cayos. Esta máscara de tierra se aplicó a todos los datos generados en el estudio (relieve, tipo de cobertura y tipo de suelo) para garantizar homogeneidad. La máscara de tierra y otras zonas cubiertas de agua, como embalses y lagunas, son identificadas por el WPS a partir de los datos de cobertura.

El relieve es uno de los parámetros de frontera determinantes en el desempeño de los modelos numéricos meteorológicos. Se utilizó el modelo digital de superficie (DSM) ALOS WORLD 3D, generado por la misión japonesa PRISM, con una resolución horizontal de un arco-segundo, aproximadamente 30 metros en el ecuador (Tadono *et al.*, 2014). La selección de este modelo tiene como ventajas su cobertura global y la representación de objetos en la superficie del suelo, como la vegetación y las modificaciones humanas en el relieve. Ejemplos de esto último son movimientos de tierra, edificios altos y carreteras. Las limitaciones de este tipo de DSM están asociadas con posibles errores en zonas nevadas o pendientes muy abruptas y elevadas que no son de significativa importancia en el área de estudio.



Debido a la diferencia de escalas de los datos del catastro nacional con respecto a las otras fuentes, se realizó un proceso de ajuste progresivo siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

1. Conversión vector-raster a 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m) de resolución espacial.
2. Reducción de ruido eliminando píxeles sueltos y agrupaciones menores de aproximadamente 1 km² de superficie.
3. Reclasificación.
4. Integración de datos.
5. Aplicación de máscara de mar/tierra.

En la investigación, se utilizó la clasificación de formaciones vegetales de Capote y Berazaín (1984) disponible como atributo en el Mapa Forestal Nacional. Los tipos de formación vegetal se hicieron corresponder con las clases de cobertura predeterminadas en el WPS derivadas de las clasificaciones del Servicio Geológico de Estados Unidos y del instrumento Espectro-radiómetro de imágenes de resolución moderada (USGS24+1 y MODIS20+1, respectivamente, por sus siglas en idioma inglés). La clasificación USGS24+1 toma en cuenta 24 tipos de cobertura y la superficie acuosa. Los datos de MODIS 20+1 se dividen en 20 clases de cobertura y superficie acuosa. En ambos casos, la superficie acuosa se refiere a lagos y cursos de agua, ya que el área ocupada por los mares y océanos es una de las clases. Esta clase no es parte de la clasificación original, en la que la superficie cubierta de agua no diferencia entre lagos y el océano. Es una clase adicionada únicamente para el sistema de modelación, por lo que se definió en todos los casos.

En el caso del suelo, se utilizó el Mapa Genético de los Suelos de Cuba, escala 1:250 000. Fueron obtenidas equivalencias aproximadas con los datos de suelo del WRF a partir de la información del campo textura del suelo de la base de datos para hacer corresponder ambas clasificaciones.



Este proceso de equivalencias de cobertura y de suelo permitió reutilizar los parámetros ya codificados en el WRF sin necesidad de modificar el código fuente de la modelación, lo que hubiera requerido un complejo y costoso proceso de recertificación del modelo numérico.

La actualización de los metadatos del WPS del modelo se realizó para todo el archipiélago cubano garantizando la coherencia física: termodinámica e hidrodinámica, de las variables meteorológicas que caracterizan los ecosistemas agroforestales en todo el país.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relieve

Se generaron dos DSM del área de interés, a escalas de 30 y 1 arco-segundos en el formato binario utilizado por el WRF (GEOGRID.EXE). La tabla de atributos (GEOGRID.TBL) de condiciones de frontera fue actualizada para utilizar por defecto estos datos.

Tipo de cobertura

Al comparar la clasificación de Capote y Berazaín con las USGS24 y MODIS20 se observan coincidencias en cuanto a características generales y edafoclimáticas de varias clases. Estas coincidencias permitieron asociar directamente una parte de las clasificaciones. Las Tablas 1 y 2 muestran ejemplos de las correlaciones identificadas entre las clasificaciones. En los anexos 1 y 2, se muestran las equivalencias de las clasificaciones de Capote y Berazaín con las del USGS24 y MODIS20, respectivamente, utilizadas en el estudio.



Tabla 1. - Ejemplos de las equivalencias de las clasificaciones de Capote y Berazain con las del USGS24

No	Capote & Berazain	Código	USGS24
41	Bosque Caducifolio	11	Bosque caducifolio
34	Bosque nublado típico (1600-1900m)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
32	Bosque Semideciduo Micrófilo	8	Charrascales
45	Encinar	15	Bosques mixtos
44	Matorral de Ciénaga	18	Humedal boscoso
38	Pinares de <i>Pinus caribaea</i>	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
6	Plantaciones Latifolias	15	Bosques mixtos
26	Pluvisilva de baja altitud	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
43	Sabanas naturales S. L	10	Sabanas
39	Zonas desnudas y semidesnudas	19	Estéril o escasa vegetación

Tabla 2. - Ejemplos de las equivalencias de las clasificaciones de Capote y Berazain con las del MODIS20

No	Capote & Berazain	Código M20	MODIS20
41	Bosque Caducifolio	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
34	Bosque nublado típico (1600-1900m)	2	Bosque siempreverde de hojas anchas
32	Bosque Semideciduo Micrófilo	6	Charrascales cerrados
45	Encinar	5	Bosque mixtos
44	Matorral de Ciénaga	11	Humedales permanentes s
38	Pinares de <i>Pinus caribaea</i>	1	Bosques siempre verdes de coníferas
6	Plantaciones Latifolias	5	Bosques mixtos
26	Pluvisilva de baja altitud	2	Bosque siempreverde de hojas anchas
43	Sabanas naturales S. L	9	Sabanas
39	Zonas desnudas y semidesnudas	16	Estéril o escasamente vegetado



Las agrupaciones forestales de Capote y Berazaín, que por sus complejidades no tenían correspondencias directas con MODIS24 y USGS20, fueron agrupadas teniendo en cuenta su estructura mayoritaria o composición específica en las clasificaciones objetivas. Estas agrupaciones se describen a continuación:

- a) En la clase Bosques caducifolios se agruparon cinco de las agrupaciones de Capote y Berazaín: "Bosques siempreverdes micrófilos costero y subcostero (monte seco)"; "Bosque semidecíduo mesófilo típico sobre suelo ácido"; "Bosque semidecíduo mesófilo con humedad fluctuante"; "Matorral espinoso semidesértico costero" y "Matorrales indiferenciados, mayoritariamente secundarios y marabuzales, maniguas y pastos con matorrales, bosques secundarios muy degradados y ralos".
- b) En Bosque siempreverde de hojas anchas se agruparon: "El bosque siempre verde de ciénaga típico"; "Complejos de vegetación de mogotes"; "Charrascales" como el "Matorral xeromorfo espinoso sobre serpentinita (cuabal)"; "Matorral costero y subcostero con abundancia de suculentas (manigua costera)" y los "Bosque siempreverde micrófilo calcifobo"
- c) Adicionalmente, los "Bosques siempreverde micrófilo calcifobo" y el "Complejo de Vegetación de Terrazas" fueron incluidos en charrascales para ambas clasificaciones internacionales de cobertura.

El Mapa Forestal Nacional cubre solamente las áreas forestales, por lo que se utilizó el Catastro Nacional para completar el área de estudio. En todos los casos la prioridad se asignó al Mapa de Catastro Nacional. La Tabla 3 muestra ejemplos de las equivalencias utilizadas entre el tipo de uso del Catastro Nacional y las predeterminadas en el WRF. En el Anexo 3 se detalla la conversión utilizada en el estudio.



Tabla 3. - Ejemplos de las equivalencias de tipos de uso entre el Catastro Nacional con las del USGS24 y MODIS20

Tipo de uso catastro nacional	IDUso	USGS24	MODIS20
Apoyo a la producción agropecuaria	8420	1	13
Asentamientos urbanos	8010	1	13
Asentamientos rurales	8020	1	13
Autopistas	8110	1	13
Ferrocarril público	8210	1	13
Otras instalaciones de transporte	8290	1	13
Cultivos varios	1010	4	12
Deforestada	5060	7	10
Superficie ociosa (ganadería)	4060	8	6
Café	2310	13	2
Cacao	2410	13	2
Bosques naturales	5100	13	2

Se generaron dos bases de datos de cobertura con las clases correspondientes a USGS24+1 y MODIS20+1. Similar al caso del relieve, estas bases de datos de tipo de cobertura se transformaron al formato binario ejecutable del WRF (GEOGRID.EXE). El resultado se actualizó a la tabla de atributos correspondiente. Se crearon dos nuevas tablas disponibles para los procesos de modelación.

Tipo de suelo

En este caso, se utilizó una resolución ráster equivalente de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 m). que aparecen en la Tabla 4.



Tabla 4. - Equivalencias utilizadas de la base de datos del Mapa Genético de los Suelos de Cuba con las categorías de suelo del WRF

Textura	Clase de suelo WRF	Textura	Clase de suelo WRF
Loam arcilloso	9	Arena	1
Arcilla	12	Arcilla coalinitica	11
Loam arcillo-arenoso- Loam arenoso	7	Arcilla arenosa	10
Loam	6	Arcilla loamosa	8
Arcilla montmorillonitica	11		

La base de datos de tipo de suelo se transformó al formato binario ejecutable del WRF (GEOGRID.EXE). El resultado tuvo el mismo tratamiento y generalización que las enunciadas anteriormente. En este caso las tablas se actualizaron empleando el mismo tipo de suelo para la superficie y el límite inferior.

Postprocesamiento y distribución de los resultados

En total, se generaron siete paquetes de datos binarios en formato compatible con el sistema de preprocesamiento del WRF WPS. Estos datos se componen de un paquete de datos de relieve con 1 arco-segundo de resolución espacial, dos paquetes de cobertura con clases compatibles con USGS24+1 a 1 y 30 arco-segundos, dos paquetes de cobertura con clases compatibles con MODIS20+1 a 1 y 30 arco-segundos, y dos paquetes de datos de tipo de suelo a 1 y 30 arco-segundos de resolución espacial. Adicionalmente, se creó una tabla especializada para la configuración del sistema de preprocesamiento del WRF (WPS_CUB.TAB) con los parámetros necesarios para su integración expedita en las modelaciones. Todos estos datos se encuentran integrados en el sistema de modelación del Centro de Física de la Atmósfera del INSMET, y están disponibles para su uso por la comunidad científica a través de contacto con los autores.



Aportes de la integración de las bases de datos espaciales de alta resolución al WRF

Al considerar los aportes de la integración de las bases de datos espaciales de alta resolución al WRF para el análisis del clima local en montañas de Cuba, los resultados alcanzados son consistentes con una mayor calidad de las condiciones de frontera estáticas, como se sugieren en Varga y Breuer (2020). Es de destacar que, como resultado del proceso realizado, se identificaron cambios significativos en la distribución de las clases de cobertura entre los datos suministrados como predeterminados en el WRF y los compilados en esta investigación. En general, los datos integrados presentan una distribución más acorde con lo esperado para el archipiélago cubano. Por ejemplo, en el caso de las clases MODIS 20+1, se aprecia un incremento mayor del 5 % de las áreas de bosque caducifolio de hoja ancha, charrascal cerrado, sabanas y humedales permanentes. Este incremento en la distribución de área estuvo condicionado por la disminución del área asignada a tierras de cultivo y pastizales (8 y 10 %) entre otros. Debe notarse la mejor definición de las áreas pobladas, que se incrementó de prácticamente cero a un 3 % del territorio nacional. La Figura 2 muestra las distribuciones de las clases en mayor detalle. Es de especial interés que la clase 21 (lagos y ríos) se mantiene prácticamente sin variación, lo que es consistente con la capacidad del instrumento MODIS para detectar zonas cubiertas de agua de forma muy precisa (Chu *et al.*, 2021), capacidad que no se extiende necesariamente a las regiones cubiertas de vegetación tropical y antropizadas. En este último caso, es significativo que los algoritmos globales de clasificación no reconocen de forma apropiada las zonas pobladas en el área de estudio, lo que posiblemente se extiende a los países en desarrollo fuera de las ciudades principales, lo que puede deberse a diferencias estructurales con las regiones más desarrolladas.



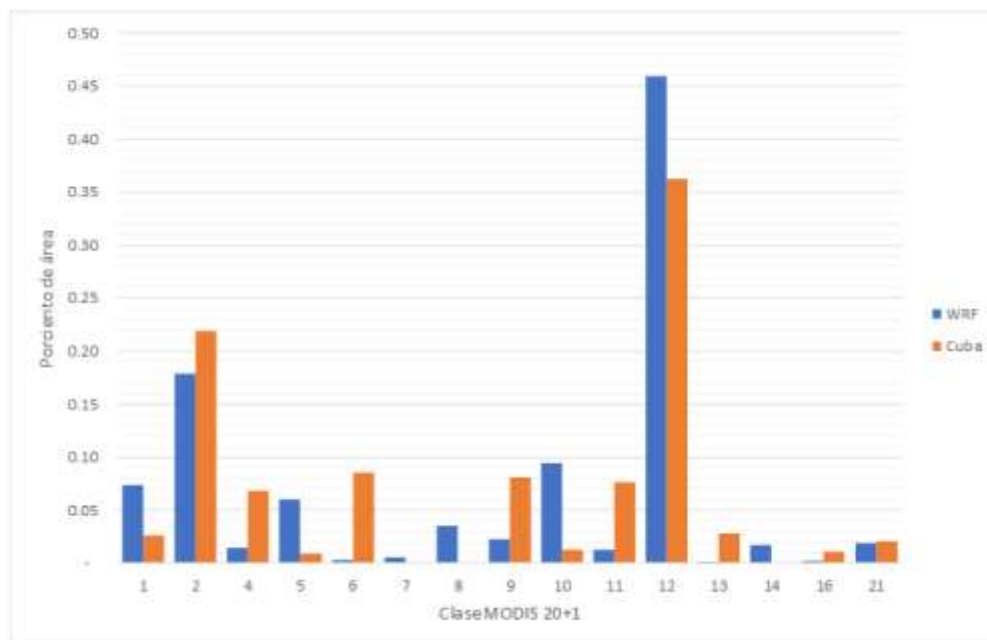


Fig. 2. - Comparación entre la proporción de área de la data original MODIS20+1 (WRF) y la generada en esta investigación (Cuba). 1: Bosque siempreverde coníferas, 2: Bosque siempreverde de hoja ancha, 4: Bosque caducifolio de hoja ancha, 5: Bosques Mixtos, 6: Charrascal cerrado, 7: Charrascal abierto, 8: Sabanas con árboles, 9: Sabanas, 10: Pastizales, 11: Humedales permanentes, 12: Tierras de cultivo, 13: Urbano y Edificado, 14: Mosaico de tierra de cultivo y vegetación natural, 16: Estéril o escasamente vegetado, 21: Lagos/ríos. Este último es la clase adicional. No se incluye el océano.

En los resultados del estudio, se aprecia un desarrollo en la definición de la distribución de las categorías de cobertura y suelo, con mejor identificación de la interfase mar y tierra. Estos cambios se reflejan en el incremento del desempeño del WRF a escala local en condiciones de montaña identificado por Peña-de la Cruz *et al.* (2023). La primera fila de la Figura 3, en las celdas b, se presentan ejemplos del aumento de la definición de los datos integrados durante la investigación. En la segunda y tercera fila, se muestran la resolución espacial de los datos de frontera estática en el WRF. En la segunda fila, los datos predeterminados en el modelo; en la tercera, los datos espaciales integrados de alta resolución. En la celda 1.1, se evidencia el incremento en los detalles de los elementos geográficos, que corrigen la definición de valles, cañadas y ríos en las zonas montañosas. La celda 2.1 permite observar



el desarrollo entre las bases de datos de superficie, especialmente la mejor definición de la línea costera y de la variación en la distribución y tipo de cobertura. Un ejemplo de esto último es notable en las zonas naturales como los macizos montañosos y la Ciénega de Zapata. En la celda 3.1, se aprecia un fenómeno relativamente común en países en desarrollo; la resolución de la capa suministrada es incluso menor que los 30 segundos de arco, resolución definida como predeterminada para esta variable, tipo de suelo, en el WRF. Este efecto es frecuente en los dominios espaciales no pertenecientes a las regiones más desarrolladas, donde los datos globales son más escasos e imprecisos. En este caso, al incremento de la definición espacial de la variable se añade una mayor variabilidad de clases, con categorías más cercanas a las condiciones reales del área de estudio.

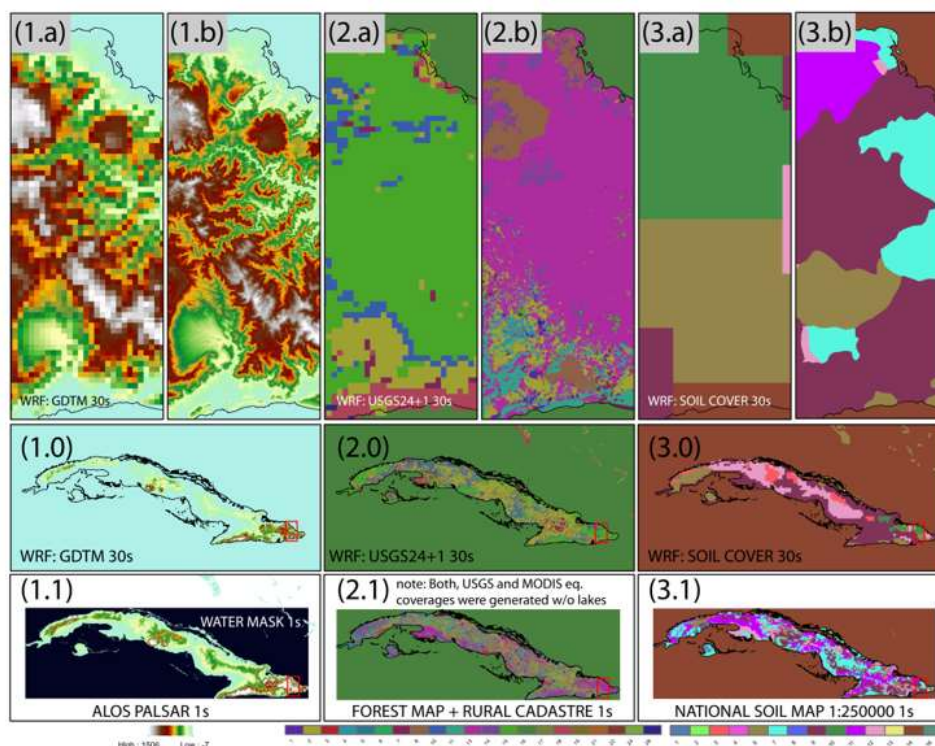


Fig. 3. - Bases de datos espaciales en el WRF como condiciones de frontera estática. Las imágenes de la 1.^a fila: a, antes y b, luego de integrada las bases de datos espaciales de alta resolución. 2.^a fila: las bases de datos espaciales predeterminadas en el modelo; 3.^a fila las bases de datos espaciales de alta resolución integradas al modelo.



Las mejoras identificadas robustecen la capacidad de las modelaciones basadas en WRF para integrar los factores geográficos formadores del clima local, con beneficios sobre todo en las regiones montañosas. Entre las aplicaciones directas del estudio se pueden destacar el fortalecimiento de la modelación y pronóstico de las condiciones meteorológicas que influyen en la aparición y desarrollo de incendios forestales como lo hace notar Zamora Fernández *et al.* (2020; 2022).

De igual manera, los resultados obtenidos pueden aportar al incremento de la resolución espacial y efectividad de los estudios del clima local presente y futuro en las montañas. Análogamente, los resultados obtenidos en esta investigación beneficiarán los estudios de gestión de riesgos asociados a incendios forestales, eventos hidrometeorológicos severos, la variabilidad climática y el cambio climático, y otros peligros relacionados con el sistema climático que han afectado los ecosistemas agroforestales cubanos.

CONCLUSIONES

La integración de un conjunto de datos espaciales de alta resolución al modelo WRF robustece su capacidad para el análisis de los factores geográficos formadores del clima local en las montañas. La integración de un conjunto de datos espaciales de alta resolución al WRF se mejora la habilidad del modelo para la vigilancia y pronóstico meteorológico y climático a escala local en las montañas de Cuba.

Agradecimientos

La investigación que da origen a los resultados presentados recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales bajo el código PN211LH009-036 "Impactos del cambio climático a mediano plazo en los topoclimas asociados al café y cacao en Cuba".



Anexo 1. (Tabla 5).

Tabla 5. - Equivalencias de las clasificaciones de Capote y Berazain con las del USGS 24

No	Capote & Berazain	Código	USGS 24
41	Bosque Caducifolio	11	Bosque caducifolio
34	Bosque nublado típico (1 600-1 900m)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
35	Bosque pluvial montano (800-1 600m)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
8	Bosque semideciduo mesófilo con humedad fluctuante	13	Bosque siempre verdes de hoja anchas
1	Bosque Semideciduo Mesófilo típico	11	Bosque caducifolio
16	Bosque semideciduo mesófilo típico sobre suelo ácido	11	Bosque caducifolio
32	Bosque Semideciduo Micrófilo	8	Charrascales
42	Bosque siempreverde de ciénaga bajo	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
7	Bosque siempreverde de ciénaga típico	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
2	Bosque siempreverde de mangles (manglar)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas.
17	Bosque siempreverde mesófilo de baja altitud (menor de 400m)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
27	Bosque siempreverde mesófilo submontano (400-800m)	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
28	Bosque siempreverde Micrófilo calcifobo	8	Charrascales
4	Bosque siempreverde Micrófilo costero y subcostero (monte seco)	11	Bosque caducifolio
18	Bosques indiferenciados; mayoritariamente secundarios, seminaturales y ralos; plantaciones, arboledas, maniguas y matorrales	13	Bosque siempre verdes de hoja ancha
30	Charrascal Montano	8	Charrascales
10	Complejo de Vegetación de Mogote	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
36	Complejo de Vegetación de Terrazas	8	Charrascales
45	Encinar	15	Bosques mixtos



5	Herbazal de Ciénaga	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
3	Matorral costero y subcostero con abundancia de suculentas (manigua costera)	8	Charrascales
44	Matorral de Ciénaga	18	Humedal boscoso
21	Matorral Espinoso Semidesértico Costero	11	Bosque caducifolio
22	Matorral xeromorfo espinoso sobre serpentinita (cuabal)	8	Charrascales
29	Matorral xeromorfo subespinoso sobre serpentinita (charrascal)	8	Charrascales
19	Matorrales indiferenciados, mayoritariamente secundarios y marabuzales, maniguas y pastos con matorrales, bosques secundarios muy degradados ralos	11	Bosque caducifolio
40	Matorrales sobre Arenita	13	charrascales
35	Monte Fresco	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
38	Pinares de <i>Pinus caribaea</i>	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
9	Pinares de <i>Pinus caribaea</i> y <i>Pinus tropicalis</i>	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
23	Pinares de <i>Pinus cubensis</i>	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
33	Pinares de <i>Pinus maestrensis</i>	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
13	Pinares de <i>Pinus tropicalis</i> sobre arenas blancas	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
12	Plantaciones de Pino	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
14	Plantaciones de Pino Jóvenes	14	Bosques siempre verdes de Coníferas
6	Plantaciones Latifolias	15	Bosques mixtos
15	Plantaciones Latifolias Jóvenes	13	Bosques siempre verdes de hojas anchas
26	Pluvisilva de baja altitud	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
31	Pluvisilva Esclerofila Submontana sobre Mal Drenaje	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
24	Pluvisilva Esclerofila Submontana sobre Serpentinita	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas



25	Pluvivilva Submontana sobre Comp. Metamórfico	13	Bosques siempreverdes de hojas anchas
43	Sabanas naturales S.L	10	Sabanas
37	Saladares	19	Estéril o escasa vegetación
39	Zonas desnudas y semidesnudas	19	Estéril o escasamente vegetado

Anexo 2. (Tabla 6).

Tabla 6. - *Equivalencias de las clasificaciones de Capote y Berazain con las del MODIS 20*

No	Capote & Berazain	Código	MODIS 20
41	Bosque Caducifolio	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
34	Bosque nublado típico (1 600-1 900m)	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
35	Bosque pluvial montano (800-1 600m)	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
8	Bosque semideciduo mesófilo con humedad fluctuante	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
1	Bosque Semideciduo mesófilo típico	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
16	Bosque semideciduo mesófilo típico sobre suelo ácido		Bosque caducifolio de hojas anchas
32	Bosque Semideciduo Micrófilo	6	Charrascales cerrado
42	Bosque siempreverde de ciénaga bajo	11	Bosque caducifolio de hojas anchas
7	Bosque siempreverde de ciénaga típico	2	Bosque siempre verde de hojas ancha
2	Bosque siempreverde de mangles (manglar)	11	Humedales permanentes
17	Bosque siempreverde mesófilo de baja altitud (menor de 400m)	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
27	Bosque siempreverde mesófilo submontano (400-800m)	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
28	Bosque siempreverde micrófilo calcifobo	6	Charrascales cerrados



4	Bosque siempreverde micrófilo costero y subcostero (monte seco)	4	Bosque caducifolio de hoja anchas
18	Bosques indiferenciados; mayoritariamente secundarios, seminaturales y ralos; plantaciones, arboledas, maniguas y matorrales	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
30	Charrascal Montano	6	Charrascales cerrados
10	Complejo de Vegetación de Mogote	2	Bosque siempre verde de hojas ancha
36	Complejo de Vegetación de Terrazas	6	Charrascal cerrado
45	Encinar	5	Bosque mixtos
5	Herbazal de Ciénaga	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
3	Matorral costero y subcostero con abundancia de suculentas (manigua costera)	6	Charrascales cerrados
44	Matorral de Ciénaga	11	Humedales permanentes
21	Matorral Espinoso Semidesértico Costero	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
22	Matorral xeromorfo espinoso sobre serpentinita (cuabal)	6	Charrascales cerrados
29	Matorral xeromorfo subespinoso sobre serpentinita (charrascal)	6	Charrascal cerrado
19	Matorrales indiferenciados, mayoritariamente secundarios y marabuzales, maniguas y pastos con matorrales, bosques secundarios muy degradados y ralos	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
40	Matorrales sobre Arenita	2	Charrascal abierto
35	Monte Fresco	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
38	Pinares de <i>Pinus caribaea</i>	1	Bosques siempre verdes de coníferas
9	Pinares de <i>Pinus caribaea</i> y <i>Pinus tropicalis</i>	1	Bosques siempre verdes de coníferas
23	Pinares de <i>Pinus cubensis</i>	1	Bosques siempre verdes de coníferas
33	Pinares de <i>Pinus maestrensis</i>	1	Bosques siempreverdes de coníferas
12	Plantaciones de Pino	1	Bosques siempre verdes de coníferas



14	Plantaciones de Pino Jóvenes	1	Bosques siempre verdes de coníferas
6	Plantaciones Latifolias	5	Bosques mixtos
15	Plantaciones Latifolias Jóvenes	4	Bosque caducifolio de hojas anchas
26	Pluvisilva de baja altitud	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
31	Pluvisilva Esclerofila Submontana sobre Mal Drenaje	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
24	Pluvisilva Esclerófila Submontana sobre Serpentina	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
25	Pluvisilva Submontana sobre Comp. Metamórfico	2	Bosque siempreverde de hojas ancha
43	Sabanas naturales S. L	9	Sabanas
37	Saladares	16	Estéril o escasamente vegetado
39	Zonas desnudas y semidesnudas	16	Estéril o escasamente vegetado

Anexo 3. (Tabla 7).

Tabla 7.- Conversión de clases para el Catastro Nacional

Tipo de uso del suelo catastro nacional	IDUso	USGS24	MODIS20	USGS24+I	MODIS20+I
Apoyo a la producción agropecuaria	8420	1	13	1	13
Apoyo a la producción silvícola	-	1	13	1	13
Asentamientos urbanos	8010	1	13	1	13
Asentamientos rurales	8020	1	13	1	13
Superficie ocupada por vertederos	8340	1	13	1	13
Instalaciones educacionales	8600	1	13	1	13
Instalaciones turística-recreativa	8700	1	13	1	13
Otras Instalaciones	8900	1	13	1	13
Autopistas	8110	1	13	1	13
Carreteras	8120	1	13	1	13
Avenidas	8121	1	13	1	13



Calles principales	8122	1	13	1	13
Calles secundarias	8123	1	13	1	13
Vías de interés específicos	8130	1	13	1	13
Ferrocarril público	8210	1	13	1	13
Ferrocarril cañero	8220	1	13	1	13
Ferrocarril industrial	8230	1	13	1	13
Otras instalaciones de transporte	8290	1	13	1	13
Aeropuertos	8240	1	13	1	13
Aeropuerto internacional	8241	1	13	1	13
Aeropuerto nacional	8242	1	13	1	13
Superficie de Instalaciones industrial	8320	1	13	1	13
Superficie de explotación minera	8330	1	13	1	13
Viveros y semilleros	2900	2	12	2	12
Caña de azúcar	3000	2	12	2	12
Cítrico	2210	2	12	2	12
Viveros y semilleros de cítricos	2920	2	12	2	12
Henequén	1910	2	12	2	12
Kenaf	1920	2	12	2	12
Tabaco	1410	2	12	2	12
Plátano	2110	2	12	2	12
Viveros y semilleros de frutales	2960	2	12	2	12
Otros cultivos temporales	1900	2	12	2	12
Pastos naturales	4100	2	12	2	12
Pastos y forrajes	4200	2	12	2	12
Forrajes temporales	4300	2	12	2	12
Producción pecuaria	8410	2	10	2	10
Arroz	1210	3	12	3	12
Cultivos varios	1010	4	12	4	12
Viveros y semilleros de pastos y forrajes	2980	4	12	4	12
Deforestada	5060	7	10	7	10
Otras no aptas	8000	7	10	7	10



Superficie ociosa (ganadería)	4060	8	6	8	6
Café	2310	13	2	13	2
Viveros y semilleros de café	2930	13	2	13	2
Cacao	2410	13	2	13	2
Viveros y semilleros de cacao	2940	13	2	13	2
Frutales	2290	13	2	13	2
Otros cultivos permanentes	2910	13	2	13	2
Viveros y semilleros de otros permanentes	2990	13	2	13	2
Bosques naturales	5100	13	2	13	2
Latifolias	5220	13	2	13	2
Coníferas	5210	14	1	14	1
Hídrica natural	7100	16	17	28	21
Embalses	7200	16	17	28	21
Canales	7300	16	17	28	21
Herbazal de ciénagas	7400	17	11	17	11

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFRIZAL, T. y SURUSSAVADEE, Ch., 2018. High-Resolution Climate Simulations in the Tropics with Complex Terrain Employing the CESM/WRF Model. *Advances in Meteorology*, vol. 2018, ISSN 1687-9309, 1687-9317. DOI 10.1155/2018/5707819.
- CAPOTE, R.P. y BERAZAÍN, R., 1984. Clasificación de las formaciones vegetales de Cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, vol. 5, no. 2, ISSN 02535696. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/42596743>
- CENTECLA-ARTOLA, A., BENZANILLA-MORLOT, A., VICHOT, A. y MARTÍNEZ-CASTRO, D., 2020. Estimación del clima futuro en Cuba a partir de modelos climáticos. Informe de Resultado. Habana, Cuba: Instituto de Meteorología.



CENTELLA-ARTOLA, A., BEZANILLA-MORLOT, A., SERRANO-NOTIVOLI, R., VÁZQUEZ-MONTENEGRO, R., SIERRA-LORENZO, M. y CHANG-DOMINGUEZ, D., 2023. A new long term gridded daily precipitation dataset at high-resolution for Cuba (CubaPrec1). *Data in Brief*, vol. 48, ISSN 23523409. DOI 10.1016/j.dib.2023.109294.

CHU, D., SHEN, H., GUAN, X., CHEN, J., LI, X., LI, J. y ZHANG, L., 2021. Long time-series NDVI reconstruction in cloud-prone regions via spatio-temporal tensor completion. *Remote Sensing of Environment*, vol. 264, DOI 10.1016/j.rse.2021.112632.

DELGADO-TÉLLEZ, R. y PEÑA-DE LA CRUZ, A., 2019. Cartografía de variables climáticas basada en gradientes, sistemas de expertos y SIG. *Revista Cubana de Meteorología.*, vol. 25, no. 2, ISSN 0864-151X. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/464/639>

HARDY CASADO, V., VILARIÑO CORELLA, C.M., NIEVES JULBE, A.F., FERNÁNDEZ CRUZ, S., ARIAS GUEVARA, M. de los Á. y PEÑA RODRÍGUEZ, E., 2021. Resiliencia local. Evaluación orientada a la reducción de riesgos por incendios forestales. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 9, no. 3, Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/698>

MOLINA-PELEGRÍN, Y., GEADA LÓPEZ, G., SOSA-LÓPEZ, A., PUIG-PÉREZ, A., RODRÍGUEZ-FONSECA, J.L. y RAMÓN-PUEBLA, A., 2021. Proyección del hábitat potencial de *Magnolia cubensis* subsp. *ubensis* en el oriente de Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 9, no. 2, ISSN 2310-3469. Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/699>.

NCAR, 2018. *Weather Research and Forecasting Model ARW. Version 4 Modeling System User's Guide*. julio 2018. S.l.: Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory, National Center for Atmospheric Research.



- PEÑA-DE LA CRUZ, A., DELGADO-TÉLLEZ, R., SIERRA-LORENZO, M., MORLOT, A.B., SAVÓN-VACIANO, Y. y RODRÍGUEZ-MONTOYA, L., 2023. Sensibilidad del WRF en topoclimas del oriente de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 29, no. 4, ISSN 2664-0880. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/811>
- POSPEHOV, G.B., SAVÓN, Y., DELGADO, R., CASTELLANOS, E.A. y PEÑA, A., 2023. Inventory Of Landslides Triggered By Hurricane Matthews In Guantánamo, Cuba. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, vol. 16, no. 1, ISSN 2542-1565, 2071-9388. DOI 10.24057/2071-9388-2022-133.
- TADONO, T., ISHIDA, H., ODA, F., NAITO, S., MINAKAWA, K. y IWAMOTO, H., 2014. Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-4, DOI 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014. Disponible en: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/II-4/71/2014/isprsannals-II-4-71-2014.pdf>
- TORRES, I.C. y LORENZO, M.S., 2023. Evaluación del pronóstico cuantitativo de la precipitación del SisPI2.0. *Revista Cubana de Meteorología* [en línea], vol. 29, no. 2, [consulta: 21 octubre 2023]. ISSN 2664-0880. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/765>.
- VARGA, Á.J. y BREUER, H., 2020. Sensitivity of simulated temperature, precipitation, and global radiation to different WRF configurations over the Carpathian Basin for regional climate applications. *Climate Dynamics* [en línea], [consulta: 14 septiembre 2020]. ISSN 0930-7575, 1432-0894. DOI 10.1007/s00382-020-05416-x. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s00382-020-05416-x>.
- VICHOT-LLANO, A., MARTINEZ-CASTRO, D., BEZANILLA-MORLOT, A., CENTELLA-ARTOLA, A. y GIORGI, F., 2021. Projected changes in precipitation and temperature regimes and extremes over the Caribbean and Central America using a multiparameter ensemble of RegCM4. *International Journal of Climatology*, vol. 41, no. 2, ISSN 0899-8418, 1097-0088. DOI 10.1002/joc.6811.



WANG, X., TOLKSDORF, V., OTTO, M. y SCHERER, D., 2020. WRF based Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis Data for High Mountain Asia: Towards a New Version of the High Asia Refined Analysis. *International Journal of Climatology*, DOI <https://doi.org/10.1002/joc.6686>.

ZAMORA FERNÁNDEZ, M. de los Á. y AZANZA RICARDO, J., 2020. Influencia de factores geográficos y meteorológicos en incendios forestales de las Tunas. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 8, no. 3, Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/639>

ZAMORA FERNÁNDEZ, M. de los A., AZANZA RICARDO, J. y BEZANILLA MORLOT, A., 2022. Impacto del cambio climático en la generación de incendios forestales en Las Tunas. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 10, no. 2, Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/729>

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

