

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 14, 2026, enero-diciembre








Artículo original

Topoclimas de agroecosistema de café para la adaptación al cambio climático en Cuba

Coffee agroecosystem topoclimates for climate change adaptation in Cuba

Topoclimas do agroecosistema cafeeiro para adaptação às mudanças climáticas em Cuba

Loexis Rodríguez-Montoya^{1*}  , Arisleidys Peña de la Cruz¹  ,
Ricardo Delgado-Tellez¹  , Carlos Alberto Miranda-Sierra¹  ,
Yusmira Savón-Vaciano² 

¹Centro Meteorológico Provincial (CMP) Guantánamo, Cuba

²Instituto de Meteorología de Cuba.

*Autor para la correspondencia: loexis.rodriguez@gtm.insmet.cu

Recibido: 20/06/2025.

Aprobado: 05/03/2026.



RESUMEN

Cuba implementa el Plan de Estado "Tarea Vida" para el enfrentamiento al cambio climático, lo que exige el conocimiento de las particularidades climáticas a escala local. No obstante, persisten limitaciones para incorporar estas singularidades en las políticas agrícolas, lo que dificulta la gestión adaptativa de los agroecosistemas cafetaleros. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar los topoclimas asociadas a los agroecosistemas de café en los macizos montañosos del centro y oriente de Cuba, proyectando su evolución bajo escenarios de cambio climático. Metodológicamente, se integró la delimitación espacial de topoclimas, obtenida mediante patrones climáticos locales y aprendizaje automático no supervisado, con la caracterización climática presente y futura. La caracterización se realizó a partir de un ensamblaje de cinco modelos climáticos globales (MCG), forzados bajo las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): SSP2-4.5 y SSP5-8.5, utilizando el conjunto de datos de WorldClim versión 2.1. Se identificaron 10 topoclimas donde se concentra el 86 % del área total cultivada de café en Cuba: dos en el macizo Guamuhaya y ocho en los macizos orientales. Las proyecciones indican incremento de la temperatura y alteraciones en los regímenes pluviométricos, con un potencial aumento de la evapotranspiración. Estos cambios en los topoclimas reducen la disponibilidad de humedad en los agroecosistemas de café. Los hallazgos aportan bases científicas para el diseño de políticas efectivas de adaptación al cambio climático del sector cafetalero en Cuba.

Palabra clave: agroecosistemas, cambio climático, escala local, topoclima.

ABSTRACT

Cuba is implementing the "Tarea Vida" (Task Life) State Plan to address climate change, which requires knowledge of local climatic characteristics. However, limitations persist in incorporating these characteristics into agricultural policies, hindering the adaptive management of coffee agroecosystems. This study aimed to characterize the topoclimates associated with coffee agroecosystems in the mountain ranges of central and eastern Cuba, projecting their evolution under climate change scenarios. Methodologically, the spatial delimitation of topoclimates, obtained through local



climate patterns and unsupervised machine learning, was integrated with the current and future climate characterization. The characterization was performed using an assembly of five global climate models (GCMs), forced under Shared Socioeconomic Trajectories (SSPs): SSP2-4.5 and SSP5-8.5, using the WorldClim version 2.1 dataset. Ten topoclimates were identified, where 86% of Cuba's total coffee-growing area is concentrated: two in the Guamuhaia Massif and eight in the eastern highlands. Projections indicate increased temperatures and alterations in rainfall patterns, with a potential increase in evapotranspiration. These changes in topoclimates reduce moisture availability in coffee agroecosystems. The findings provide a scientific basis for designing effective climate change adaptation policies for the coffee sector in Cuba.

Keywords: agroecosystems, climate change, local scale, topoclimate.

RESUMO

Cuba está implementando o Plano de Estado "Tarea Vida" para enfrentar as mudanças climáticas, o que exige o conhecimento das características climáticas locais. No entanto, ainda existem limitações na incorporação dessas características às políticas agrícolas, dificultando a gestão adaptativa dos agroecossistemas cafeeiros. Este estudo teve como objetivo caracterizar os topoclimas associados aos agroecossistemas cafeeiros nas cordilheiras do centro e leste de Cuba, projetando sua evolução sob cenários de mudanças climáticas. Metodologicamente, a delimitação espacial dos topoclimas, obtida por meio de padrões climáticos locais e aprendizado de máquina não supervisionado, foi integrada à caracterização climática atual e futura. A caracterização foi realizada utilizando um conjunto de cinco modelos climáticos globais (MCGs), forçados por Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (TSCs): TSC2-4.5 e TSC5-8.5, com base no conjunto de dados WorldClim versão 2.1. Dez topoclimas foram identificados, onde se concentra 86% da área total de cultivo de café em Cuba: dois no Maciço de Guamuhaia e oito nas terras altas orientais. As projeções indicam aumento das temperaturas e alterações nos padrões de precipitação, com um potencial aumento da evapotranspiração. Essas mudanças no topoclima reduzem a disponibilidade de umidade nos agroecossistemas cafeeiros. Os resultados fornecem uma base científica



para o desenvolvimento de políticas eficazes de adaptação às mudanças climáticas para o setor cafeeiro em Cuba.

Palavras-chave: agroecossistemas, escala local, mudanças climáticas, topoclima.

INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas agroforestales más importantes para el desarrollo de las montañas es el cultivo de café. Sin embargo, varios estudios predicen modificaciones significativas de aptitud para este cultivo por efecto del cambio climático (Parada-Molina *et al.*, 2022; Ferrás-Negrín *et al.*, 2024). Adicionalmente, autores como Quiroz Antunez *et al.* (2022) identifican, la variabilidad climática entre los principales factores responsables de las oscilaciones anuales en la producción de este cultivo

Países productores de café establecen estrategias nacionales de enfrentamiento al cambio climático. Cuba, mediante su plan «Tarea Vida», desarrolla estudios del clima actual, proyecciones futuras e impactos. No obstante, desde el punto de vista local, los análisis aún son limitados en el tratamiento de las singularidades presentes y futuras del clima. Por consiguiente, resultan insuficientes en actividades como la agricultura y la gestión efectiva de la biodiversidad y el agua, situación que influye en la planificación del desarrollo de los agroecosistemas de café en un entorno de cambio climático (Planos-Gutiérrez, 2020).

Los agroecosistemas cafetaleros en Cuba, especialmente la especie *Coffea arabica*, se ubican en las montañas y están fuertemente vinculados al clima local, los topoclimas (Peña-de la Cruz *et al.*, 2021). Los topoclimas definen espacios críticos para este cultivo y determinan patrones diferenciados de susceptibilidad productiva ante la variabilidad climática y el cambio climático (Planos-Gutiérrez, 2020). Por lo que la caracterización de los topoclimas, presente y proyección futura debe ser considerada en el diseño de estrategias locales de adaptación del cultivo del café a la variabilidad climática y al cambio climático.



La investigación tiene el objetivo de caracterizar los topoclimas asociados a agroecosistemas cafetaleros de los macizos del centro y oriente de Cuba, proyectando su evolución bajo escenarios de cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó para los macizos montañosos Guamuhaya, Sierra Maestra y Nipe Sagua Baracoa, ubicados en el centro y oriente de Cuba (Figura 1). Estos macizos presentaron diferencias en cuanto a su geomorfología, factor geográfico que modifica el clima local (Peña-de la Cruz *et al.*, 2021). El macizo Guamuhaya es un sistema montañoso aislado y relativamente circular; Sierra Maestra es una cordillera larga y estrecha, con las mayores alturas del país, y el macizo Nipe Sagua Baracoa, el más extenso y heterogéneo en sus geformas, con montañas relativamente bajas y pendientes muy abruptas.

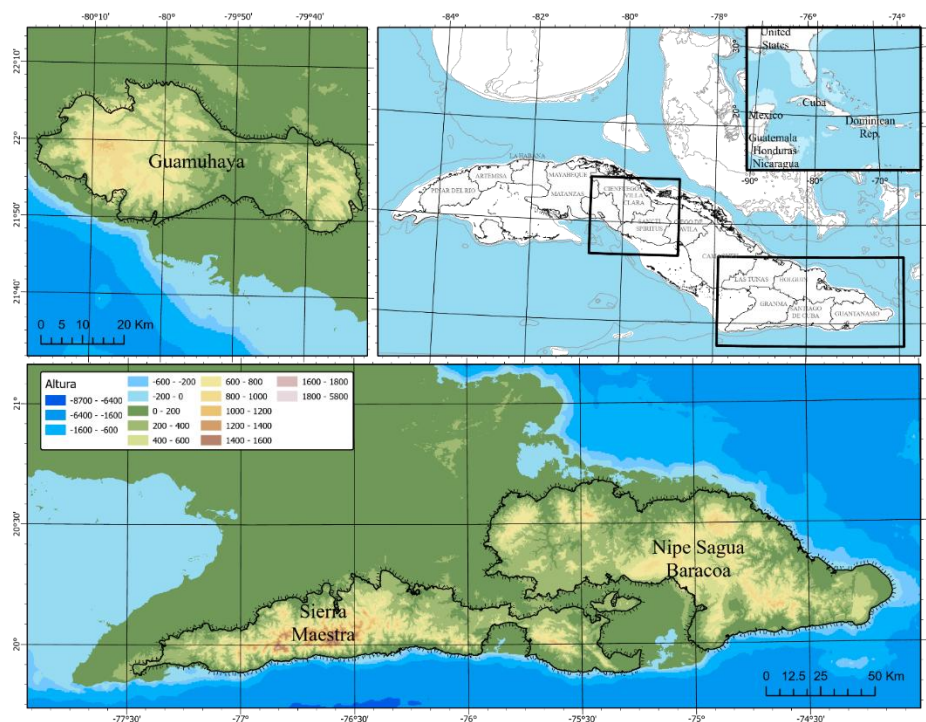


Figura 1. - Ubicación de las áreas de estudio y mapa hipsométrico. Se delimitan los límites oficiales de las regiones montañosas. agroecosistemas



El estudio se realizó en dos etapas: i) la delimitación espacial de los topoclimas asociados a los agroecosistemas de café; y ii) la caracterización y proyección de la temperatura máxima media anual y precipitación acumulada interanual en dichos topoclimas. Ambas variables bioclimáticas seleccionadas por incidir directamente en procesos fenológicos críticos como la floración, el llenado del fruto y la maduración, etapas en las que condiciones térmicas extremas o regímenes hídricos alterados pueden reducir significativamente los rendimientos (Benti, F. *et al.*, 2022). En la primera etapa se utilizó la metodología de delimitación de los topoclimas del este de Cuba por patrones climáticos locales y aprendizaje automático no supervisado (Peña-De La Cruz *et al.*, 2024, 2025). En la caracterización, actual y proyección, se usó el producto WorldClim v2.1 (Cerasoli *et al.*, 2022). Este producto emplea como datos de periodo de referencia, clima actual, la serie 1970-2000. En la proyección futura del clima a mediano plazo, utiliza la serie 2040-2060 y la serie 2080-2100 para la proyección a largo plazo.

En las proyecciones de clima futuro se utilizaron cinco modelos climáticos globales (MCG) incluidos en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos en su versión 6 (CMIP6): los modelos HadGEM3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, FIO-ESM-2-0, BCC-CSM2-MR. Todos con desempeño adecuado en el área de Centroamérica y el Caribe. Para cada MCG se consideraron dos escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP). Los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 se seleccionaron sobre la base de las tendencias de ocurrencia a juicio de Hausfather y Peters (2020). Estos autores describieron el escenario SSP2-4.5 como la trayectoria de mayor tendencia y la SSP5-8.5 de interés por simular el extremo negativo.

Se usó el paquete Bioclim implementado en lenguaje R v3.0. Los datos espaciales de las fincas productivas cafetaleras están en hectáreas (ha) y se obtuvieron del Catastro Nacional de Uso de Suelo, Nomenclador Superficie Agrícola Cultivada, Cultivo Permanente: café, metadatos IDEPA2019. Adicionalmente, se utilizaron los sistemas de análisis matemático R y Matlab para el postproceso de las salidas del WRF. El análisis espacial y procesamiento cartográfico se realizó en el software SIG ARCGIS desktop 10.7.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de identificación de los topoclimas asociadas a los agroecosistemas de café del centro y oriente de Cuba, se identificaron 10 como relevantes en función de la extensión de las áreas en producción: dos en el macizo Guamuñaya y ocho en los macizos del oriente. Estos 10 topoclimas concentran, aproximadamente, el 86 % del área total productiva de café en Cuba (Figura 2). Se observa que la delimitación geográfica de los topoclimas en los macizos Guamuñaya y Sierra Maestra es consistente con lo señalado por Peña-de la Cruz *et al.* (2021), quienes plantean que la altitud es el factor geográfico que mejor explica su distribución espacial. En cambio, en el macizo Nipe-Sagua-Baracoa, son las geformas y la exposición a los vientos alisios los factores que dominan la distribución de los topoclimas en la región nororiental de Cuba (Peña-de la Cruz *et al.*, 2021).

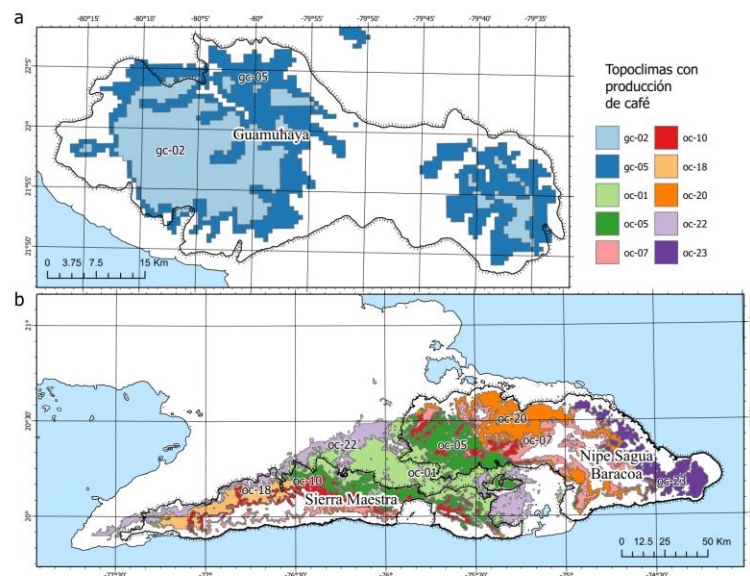


Figura 2. - Topoclimas relevantes asociados a los agroecosistemas de café del centro (a) y oriente de Cuba (b)

Diez topoclimas concentran aproximadamente el 86% de las áreas en producción de café: oc-05, oc-10, oc-07, oc-01, oc-20, oc-23, oc-18, gc-02, gc-05 y oc-22, ordenados de mayor a menor por superficie total en hectáreas. La Figura 3 muestra el comportamiento actual y proyección de la temperatura máxima media anual y el acumulado de precipitación interanual de los topoclimas de interés por periodos, escenarios y modelos climáticos



globales. Así mismo, la proyección asumió constante la delimitación espacial de los topoclimas. En todos los casos, las proyecciones climáticas futuras indican incremento en la temperatura máxima media anual y alteraciones en los regímenes pluviométricos acumulados interanuales (Figura 3).

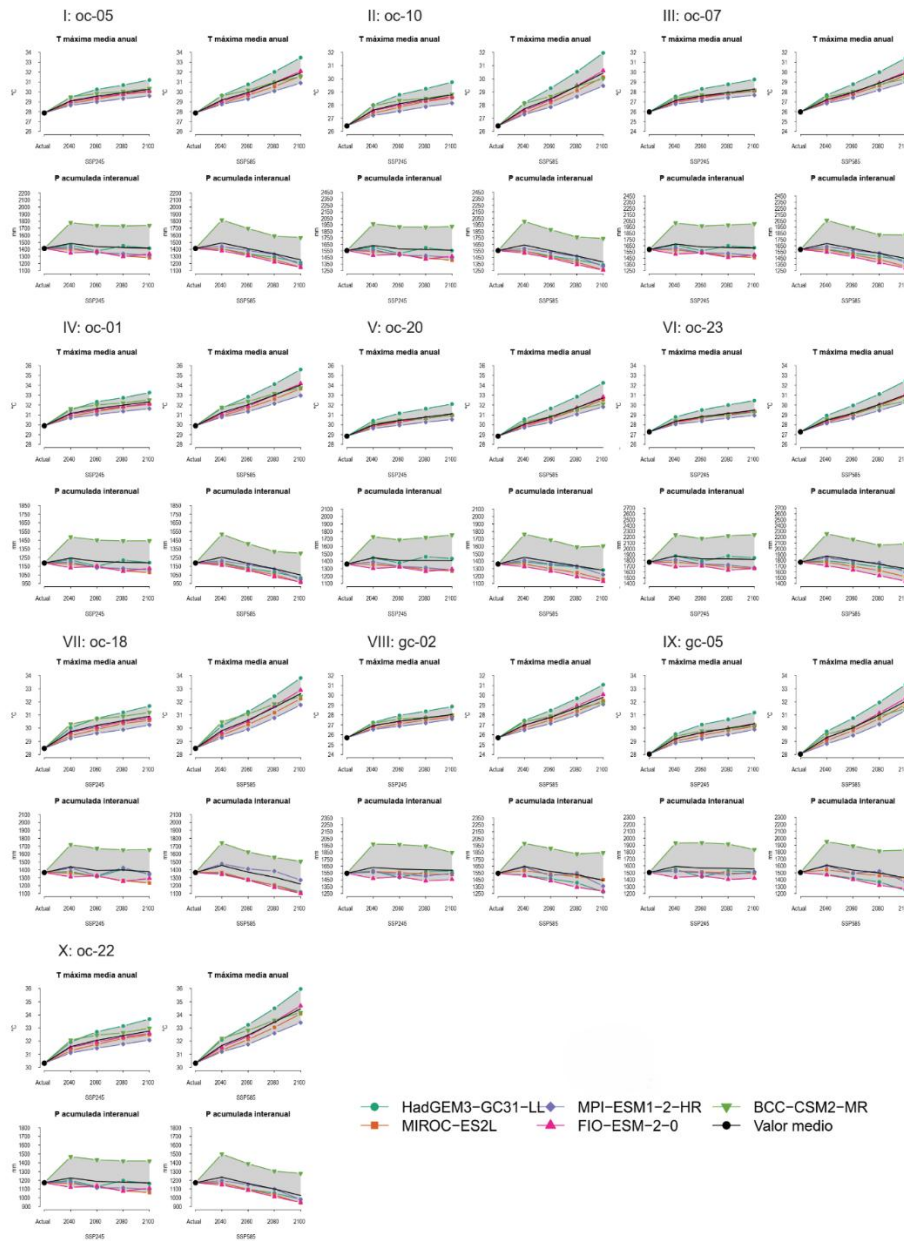


Figura 3. - Comportamiento de la temperatura máxima media anual y acumulado de precipitación interanual, para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, en los topoclimas relevantes asociadas a agroecosistemas de café del centro y oriente de Cuba



Los resultados proyectados de la temperatura máxima media anual a escala local son consistentes en el incremento de sus valores (Figura 3) y refuerzan las conclusiones de otras investigaciones recogidas en los informes al IPCC para la región del Caribe (Almazroui *et al.*, 2021; Cavazos *et al.*, 2024). El incremento proyectado indica que, en el periodo 2040, los topoclimas oc-22, oc-01, oc-20 y oc-18 presentan la mayor probabilidad de impactos negativos para la *Coffea arabica*, con valores medios superiores al umbral crítico para esta especie (≥ 28 °C) (Quiroz Antúnez *et al.* (2022). Análogamente, el incremento de los valores medios en la temperatura máxima potencialmente provocará aumento de los valores de evapotranspiración, reflejado en pérdida de la cantidad de agua disponible para los procesos biológicos en los agroecosistemas de café.

Para todos los topoclimas, los valores acumulados de la precipitación interanual presentan divergencias apreciables entre los modelos del conjunto utilizado. Esta discrepancia es consistente con el pobre desempeño de los modelos globales en la predicción de este elemento climático. En general, esta variable proyecta un ligero incremento hacia el 2040, con descenso hacia el largo plazo (Figura 3). Este comportamiento se acentúa en la trayectoria SSP5-8.5, más desfavorable.

En la proyección de la precipitación, es notable que el modelo BCC-CSM2-MR prevé un incremento de los acumulados de precipitación interanual opuesto al consenso de los modelos restantes. No obstante, el desempeño del modelo en el clima actual representa de forma coherente las características del clima en la región del Gran Caribe (Nie *et al.*, 2020). Los anteriores resultados corroboran estudios realizados por otros autores sobre el posible impacto en el ciclo del agua del aumento de la temperatura global, que se expresaría en el incremento del vapor de agua en la atmósfera y un proceso de retroalimentación positiva en las precipitaciones (Buis, 2022; Jiang *et al.*, 2023). Una consecuencia directa de estos efectos puede ser la ocurrencia de mayores volúmenes de precipitaciones dentro de fenómenos atmosféricos severos comunes en el Caribe, por ejemplo, ciclones tropicales o vaguadas. Los resultados de este análisis refuerzan los argumentos que indican que las mayores perturbaciones esperadas en las precipitaciones como resultado del cambio climático en la región se concentrarán en eventos hidrometeorológicos extremos, como episodios severos de sequía alternados con eventos intensos de precipitación (Iturbide *et al.*, 2020).



CONCLUSIONES

Diez topoclimas concentran el 86 % del área productiva de café en Cuba: dos en el macizo Guamuhaya y ocho en los macizos orientales Sierra Maestra y Nipe-Sagua-Baracoa. Esta distribución evidencia la heterogeneidad espacial de las condiciones climáticas locales que condicionan la susceptibilidad de la producción de café en el país.

Las proyecciones climáticas bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 muestran, en todos los topoclimas analizados, un incremento progresivo de la temperatura máxima media anual y alteraciones en los regímenes de precipitación interanual. Estos cambios incrementan la evapotranspiración y reducen la disponibilidad de humedad en los agroecosistemas de café, con impactos para el cultivo.

La heterogeneidad en los topoclimas documentada exige estrategias de gestión y planificación agrícola diferenciadas a escala local. Estas deben considerar las particularidades de cada topoclima como base para el diseño de políticas efectivas de adaptación al cambio climático en el sector cafetalero en Cuba, priorizando los topoclimas de mayor vulnerabilidad identificados en este estudio.

Agradecimientos

La investigación que da origen a los resultados presentados recibió fondos de la Oficina de Gestión de Fondos y Proyectos Internacionales a través de los programas PN211LH009 “Adaptación y mitigación del Cambio Climático”, PS211LH004 “Meteorología y Desarrollo Sostenible del país” y PS211LH005 “Reducción Integrada del Riesgo de Desastres en Cuba”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMAZROUI, M., ISLAM, M.N., SAEED, F., SAEED, S., ISMAIL, M., EHSAN, M.A., DIALLO, I., O'BRIEN, E., ASHFAQ, M., MARTÍNEZ-CASTRO, D., CAVAZOS, T., CEREZO-MOTA, R., TIPPETT, M.K., GUTOWSKI, W.J., ALFARO, E.J., HIDALGO, H.G., VICHOT-LLANO, A., CAMPBELL, J.D., KAMIL, S., RASHID, I.U., SYLLA, M.B., STEPHENSON, T., TAYLOR, M. y BARLOW, M., 2021.



- Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment* [en línea], vol. 5, no. 1, pp. 1-24. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 2509-9434. DOI 10.1007/s41748-021-00199-5. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.
- CERASOLI, F., D'ALESSANDRO, P. y BIONDI, M., 2022. Worldclim 2.1 versus Worldclim 1.4: Climatic niche and grid resolution affect between-version mismatches in Habitat Suitability Models predictions across Europe. En: ADS Bibcode: 2022EcoEv..12E8430C, *Ecology and Evolution* [en línea], vol. 12, pp. e8430. [consulta: 9 marzo 2026]. DOI 10.1002/ece3.8430. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022EcoEv..12E8430C>.
- CRUZ, A.P. de la, DELGADO-TÉLLEZ, R., SAVÓN-VACIANO, Y. y SIERRA, C.A.M., 2024. Datos espaciales integrados a modelo numérico para análisis meteorológico y del clima local en montañas de Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* [en línea], vol. 12, no. 1, pp. e822-e822. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 2310-3469. Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/822>.
- CRUZ, A.P. la, TÉLLEZ, R.D., VELAZCO, A.V.G., MONTOYA, L.R. y VACIANO, Y.S., 2021. Estudios de clima de montaña en Cuba, topoclimas. *Revista Cubana de Meteorología* [en línea], vol. 27, no. 3, [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 0864-151X, 2664-0880. Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/572>.
- CRUZ, A.P.-D. la, DELGADO-TÉLLEZ, R., SAVÓN-VACIANO, Y. y DING, M., 2025. Delineation of the Topoclimates of Eastern Cuba by Local Weather Patterns and Unsupervised Machine Learning. *Revista Brasileira de Meteorologia* [en línea], vol. 40, pp. e40230023. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 0102-7786, 1982-4351. DOI <https://doi.org/10.1590/0102-778640230023>. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/zPTNQbGYZwRJnrKhnWPYyN/?format=html&lang=en>.



- FERRÁS-NEGRÍN, Y., BUSTAMANTE-GONZÁLEZ, C.A., PÉREZ-SALINA, V., SÁNCHEZ-ESMORIS, C. y RIVERA-ESPINOSA, R., 2026. Vulnerabilidad y capacidad adaptativa al cambio climático en fincas cafetaleras de Jibacoa, Cuba. *Agronomía & Ambiente* [en línea], vol. 44, no. 1, pp. 92-101. [consulta: 9 marzo 2026]. DOI 10.62165/AA.44.1.0286. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/383805555_Vulnerabilidad_y_capacidad_adaptativa_al_cambio_climatico_en_fincas_cafetaleras_de_Jibacoa_Cuba.
- GUTIÉRREZ, E.O.P., 2020. Cambio climático y la gestión de la adaptación. *Revista Cubana de Administración Pública y Empresarial* [en línea], vol. 4, no. 3, pp. 322-333. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 2664-0856. Disponible en: <https://apye.esceg.cu/index.php/apye/article/view/142>.
- HAUSFATHER, Z. y PETERS, G.P., 2020. Emissions - the «business as usual» story is misleading. *Nature* [en línea], vol. 577, no. 7792, pp. 618-620. ISSN 1476-4687. DOI 10.1038/d41586-020-00177-3. Disponible en: [missions - the 'business as usual' story is misleading](https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3).
- ITURBIDE, M., GUTIÉRREZ, J.M., ALVES, L.M., BEDIA, J., CEREZO-MOTA, R., CIMADEVILLA, E., COFIÑO, A.S., DI LUCA, A., FARIA, S.H., GORODETSKAYA, I.V., HAUSER, M., HERRERA, S., HENNESSY, K., HEWITT, H.T., JONES, R.G., KRAKOVSKA, S., MANZANAS, R., MARTÍNEZ-CASTRO, D., NARISMA, G.T., NURHATI, I.S., PINTO, I., SENEVIRATNE, S.I., VAN DEN HURK, B. y VERA, C.S., 2020. An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: definition and aggregated datasets. *Earth System Science Data* [en línea], vol. 12, no. 4, pp. 2959-2970. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 1866-3508. DOI 10.5194/essd-12-2959-2020. Disponible en: <https://essd.copernicus.org/articles/12/2959/2020/>.
- JIANG, Q., CIOFFI, F., CONTICELLO, F.R., GIANNINI, M., TELESCA, V. y WANG, J., 2023. A stacked ensemble learning and non-homogeneous hidden Markov model for daily precipitation downscaling and projection. *Hydrological Processes* [en línea], vol. 37, no. 9, pp. e14992. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 1099-1085. DOI 10.1002/hyp.14992. Disponible en: [Hydrological Processes](https://doi.org/10.1002/hyp.14992).



<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.14992>.

NIE, S., FU, S., CAO, W. y JIA, X., 2020. Comparison of monthly air and land surface temperature extremes simulated using CMIP5 and CMIP6 versions of the Beijing Climate Center climate model. *Theoretical and Applied Climatology* [en línea], vol. 140, no. 1, pp. 487-502. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 1434-4483. DOI 10.1007/s00704-020-03090-x. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03090-x>.

PARADA-MOLINA, P.C., BARRADAS-MIRANDA, V.L., CEBALLOS, G.O., CERVANTES-PÉREZ, J. y CABRERA, C.R.C., 2022. Aptitud climática para *Coffea arabica* L. ante eventos climáticos extremos: Importancia de la cobertura arbórea. *Scientia Agropecuaria* [en línea], vol. 13, no. 1, pp. 53-62. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 2306-6741. DOI 10.17268/sci.agropecu.2022.005. Disponible en:

<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/3853>.

QUIROZ ANTUNEZ, U.G., MONTERROSO RIVAS, A.I., CALDERÓN VEGA, M.F., RAMÍREZ GARCÍA, A.G., QUIROZ ANTUNEZ, U.G., MONTERROSO RIVAS, A.I., CALDERÓN VEGA, M.F. y RAMÍREZ GARCÍA, A.G., 2022. Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida* [en línea], vol. 36, no. 2, pp. 60-74. [consulta: 9 marzo 2026]. ISSN 1390-8596. DOI 10.17163/lgr.n36.2022.05. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1390-85962022000200060&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

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.

