

Impactos del cambio climático en el sector aeroportuario en Cuba. Estudio preliminar

Climate change impacts on the Cuban airport sector. Preliminary study



<https://cu-id.com/2377/v30n1e04>

 Reynaldo Luis Rodríguez Arias^{1*},  Maria de los Angeles Zamora Fernández²

¹Empresa Cubana de Navegación Aérea (ECNA), Cuba.

²Inversiones GAMMA S.A., Cuba.

RESUMEN: El sector aeroportuario es de importancia vital para el desarrollo socioeconómico de los países. El mismo se encuentra en constante expansión y no está exento de los impactos del cambio climático, por lo que se hace necesario la aplicación de medidas que contribuyan a su resiliencia. En este trabajo se analizó la lista establecida por la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) para la planificación de los aeropuertos en el enfrentamiento a amenazas climáticas tales como cambio en las condiciones, aumento del nivel del mar y desertificación, explicando cómo cada uno de estas pueden impactar al sector aeroportuario y ejemplificando con afectaciones ocurridas anteriormente en aeropuertos cubanos. A partir del análisis de las tendencias y proyecciones del clima en Cuba, se realizaron propuestas de adaptación y mitigación siguiendo las recomendaciones de la OACI y otras estrategias aplicadas en otros aeropuertos del mundo. Para ello se utilizó como ejemplo el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana, Cuba. Los resultados de este trabajo ayudarán a la implantación de medidas que permitan la adaptación y mitigación del cambio climático en este importante sector económico.

Palabras claves: cambio climático, aeropuertos, mitigación, adaptación.

ABSTRACT: The aviation sector has a vital significance for the socio-economic development of nations. It is in constant expansion and is not immune to the climate change impacts. For this reason, it is necessary the application of measures that contribute to its resilience. In this paper was analyzed the established list proposed by the International Civil Aviation Organization (ICAO) in order for airports to face the climate threats such as the changing conditions, the sea-level rise and desertification; explaining how each one of them might affect the aviation sector using instances of previous damages occurred in Cuban airports. From the trends and projections analysis of the Cuban climate and the study of foreign airports experiences, were proposed adaptation and mitigation measures following the ICAO recommendations, using the José Martí International Airport as an example. The results of this paper will help to implement climate change adaptation and mitigation strategies in this important sector.

Key words: climate change, airports, mitigation, adaptation.

INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos como parte de los sistemas de transporte son un elemento vital para los países, pues en ellos diariamente se mueven personas y mercancías para realizar viajes regionales, nacionales e internacionales (Lindbergh *et al.*, 2022). Las amenazas y riesgos en los aeropuertos son de diversa índole, tales como, naturales, técnicos o tecnológicos y factores humanos

(ACRP, 2015). En los años recientes los esfuerzos se han concentrado en reducir los riesgos asociados al clima, cuyos efectos se han agravado por el calentamiento global y algunos de sus impactos derivados son inevitables para los aeropuertos y la aviación en general (International Air Transport Association, 1995).

El tráfico aéreo en el mundo está en constante expansión y su volumen se duplica aproximadamente

*Autor para correspondencia: Reynaldo Luis Rodríguez Arias. E-mail: reyluis171293@gmail.com

Recibido: 07/11/2023

Aceptado: 20/02/2024

Reynaldo Luis Rodríguez Arias. Empresa Cubana de Navegación Aérea (ECNA)

Maria de los Angeles Zamora Fernández. Inversiones GAMMA S.A. E-mail: maryzamfer97@gmail.com

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Concepción de la idea:** Reynaldo Luis Rodríguez. **Obtención de los datos:** Maria de los Angeles Zamora. **Análisis de los datos:** Reynaldo Luis Rodríguez y Maria de los Angeles Zamora. **Investigación:** Reynaldo Luis Rodríguez y Maria de los Angeles Zamora. **Redacción de manuscrito:** Reynaldo Luis Rodríguez y Maria de los Angeles Zamora.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

cada 15 años. La creciente frecuencia, intensidad y duración de eventos meteorológicos extremos, así como los efectos socioeconómicos graduales del cambio climático, tendrán un impacto en los aeropuertos (De Vivo *et al.*, 2022; Burbidge, 2018). Estos serán más vulnerables a medida que las inundaciones, interrupción de las operaciones y cancelaciones de vuelos se vuelvan más comunes (Ryley *et al.*, 2020). Los aeropuertos necesitan entender los riesgos e implantar medidas de adaptación (Dolman *et al.*, 2021), tanto para las nuevas infraestructuras como para los ya existentes, y de igual forma gestionar operaciones críticas en aras de incrementar su resiliencia al cambio climático (International Air Transport Association, 1995).

Cuba es abanderada de las ideas más revolucionarias del pensamiento científico a nivel mundial y el tema del cambio climático es parte importante de esta avanzada mentalidad. Desde la década de 1980, el gobierno cubano se interesó por estudiar el impacto del aumento del nivel medio del mar en el país. A partir de entonces se ha acumulado un impresionante número de resultados científico técnicos, en los que se han analizado los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático, y se han propuesto un número importante de medidas de adaptación, en sectores y ecosistemas estratégicos para el desarrollo (Planos *et al.*, 2013; Pérez *et al.*, 2016). El universo científico en el país sobre este tema es muy rico y diverso. Un grupo de programas de ciencia y proyectos no asociados a programas han contribuido y continúan aportando un enorme patrimonio de conocimientos, la mayoría acompañado de propuestas concretas para la adaptación (Planos *et al.*, 2013).

A pesar de esto, en el sector de la aviación en Cuba no existen muchas investigaciones relacionadas con el cambio climático. Se destaca el trabajo de Martínez & Pérez (2019), en el cual se analizaron las proyecciones de la temperatura máxima en el Aeropuerto Internacional “José Martí” de Cuba y su impacto en el despegue de las aeronaves Boeing. En el país, además, aún no se han tomado medidas de adaptación y/o mi-

tigación en ninguno de sus aeropuertos. Por tanto, el objetivo de este trabajo será analizar los riesgos, retos y oportunidades del cambio climático para los aeropuertos en Cuba, y proponer medidas de adaptación y mitigación, utilizando como ejemplo el Aeropuerto Internacional “José Martí”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características generales del territorio

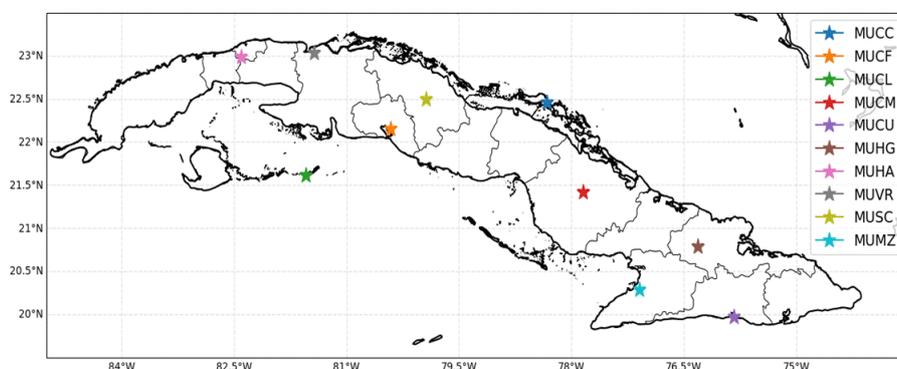
Aeropuertos de Cuba

El Sistema Aeroportuario de la República de Cuba que administra el operador denominado ECASA (Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos), cuenta con 19 aeródromos y de ellos, diez son aeródromos internacionales (Figura 1) oficialmente declarados en el Plan de Navegación Aérea y publicados en la AIP/Cuba.

Aeropuerto Internacional José Martí

El Aeropuerto Internacional José Martí es operado por la Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos S.A. (ECASA). Esta instalación aeroportuaria se ubica al suroeste de la provincia de La Habana, a unos 13 km de la costa norte, en el municipio de Boyeros, en los 22°59'21" de latitud norte y los 82°24'33" de longitud oeste (Figura 4a) (AIP, 2014). La instalación aeroportuaria posee una única pista de 4 km de longitud, orientada en dirección SW-NE (suroeste-noreste), cuyas cabeceras están designadas de acuerdo a la orientación con que las aeronaves ejecutan la aproximación: RWY 06 (58°) y RWY 24 (238°) (Figura 2) (AIP, 2014). La instalación está ubicada en una zona de llanura/llanura ondulada a 64 msnm.

Las temperaturas son generalmente altas, con valores medios anuales que oscilan desde los 24 °C hasta los 26 °C, reportándose magnitudes inferiores a los 20 °C en la temporada invernal. Según el Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989) la humedad relativa media



MUCC: Cayo Coco; MUCF: Cienfuegos; MUCL: Cayo Largo del Sur; MUCM: Camagüey; MUCU: Santiago de Cuba; MUHG: Holguín; MUHA: La Habana; MUVR: Varadero; MUSC: Santa Clara y MUMZ: Manzanillo

Figura 1. Distribución de los aeropuertos internacionales de la Isla de Cuba

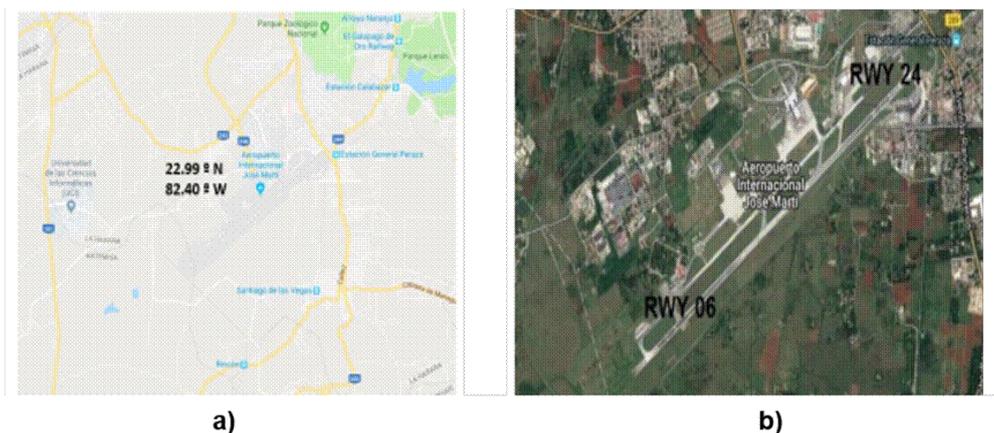


Figura 2. Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana: a) Localización geográfica; b) Orientación de la pista (<https://www.maps.google.com> y Díaz *et al.* (2021))

es alta, con valores cercanos al 80 %. En dicha zona imperan los vientos de componente este. De noviembre a abril predominan rumbos del primer cuadrante, mientras que en el verano los vientos giran más al sudeste, sobre todo con el retraimiento de la cuña anticiclónica, aportando gran contenido de humedad (Torres, 2011).

Durante la temporada de noviembre a abril, las variaciones del tiempo se hacen más notables, asociadas al paso de sistemas frontales, la influencia de centros anticiclónicos de origen continental y sistemas de bajas presiones extratropicales. De mayo a octubre, se presentan pocas variaciones en el tiempo debido a la influencia más o menos marcada del Anticiclón del Atlántico Norte. Los cambios más importantes en este período se vinculan con la presencia de disturbios en la circulación atmosférica, propios de la zona tropical: ondas del este y ciclones tropicales (Torres, 2011). La zona de Santiago de las Vegas donde se localiza el aeródromo MUHA presenta un máximo relativo de la actividad de tormentas eléctricas fuertes (racha máxima de 35.5 nudos o más) y de tormentas locales severas (definidas como aquellas que presentan tornados, caída de granizos o turbonadas con rachas lineales de 50 nudos o más) (Alfonso, 1994).

Colecta y procesamiento de datos e información

Para la realización del trabajo, primeramente, se realizó una revisión bibliográfica preliminar sobre el cambio climático, sus impactos en la aviación y las diferentes medidas de adaptación y mitigación tomadas o propuestas en otros países para la resiliencia de sus aeropuertos. Para analizar los posibles impactos del cambio climático en el sector aeroportuario de Cuba, se analizaron los elementos de la lista propuesta por la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) para la planificación de los aeropuertos ante las amenazas climáticas. Para ello se identificaron los peligros a los que están expuestos los aeropuertos cubanos teniendo en cuenta afectaciones pasadas ocurridas en estos.

Se analizaron los cambios promedios anuales de las variables meteorológicas temperatura media, mínima y máxima y acumulado de precipitaciones en Cuba utilizando el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5 obtenidos con el sistema PRECIS (*Providing REgional Climates for Impacts Studies*) con una resolución de 25 km para los años 2030 y 2050 teniendo en cuenta los datos del escenario histórico 1961-1990. Además, se interpolaron los cambios en los valores de dichas variables en el Aeropuerto Internacional José Martí desde 2020 al 2098, para ello se utilizó la interpolación lineal para el caso de las variables temperaturas y vecino más cercano para las precipitaciones como lo sugiere Zamora (2020). Los mapas fueron realizados con el módulo *cartopy* del lenguaje de programación Python.

Teniendo en cuenta estos resultados se proponen una serie de medidas de adaptación y mitigación que pueden ser aplicados en el sector aeronáutico cubano, utilizando como ejemplo el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Posibles peligros del cambio climático en los aeropuertos

Existe un consenso amplio y evidencia tangible sobre los efectos que el cambio climático está teniendo sobre la aviación, ya sea durante el transporte aéreo (incremento de turbulencias, tormentas eléctricas, hielo, vientos fuertes durante el aterrizaje y despegue, baja visibilidad, etc.) o en su infraestructura (para la operación de los aviones o el aeropuerto) (De Vivo *et al.*, 2022; Ryley *et al.*, 2020; Cofel *et al.*, 2018). La OACI ha establecido una lista de los tipos de amenazas climáticas para las que deben planificarse los aeropuertos (ACI, 2019):

- Cambios en las condiciones climáticas (cambios de temperatura, precipitación e intensidad de las tormentas)
- Aumento del nivel del mar
- Desertificación

Los siguientes puntos describirán los posibles impactos del cambio climático en los aeropuertos y sus instalaciones, asociados a fenómenos climáticos o variaciones del clima encontrados en diferentes bibliografías.

Cambios en la precipitación

El aumento de la precipitación puede provocar inundaciones de las pistas y calles de rodaje, interrumpiendo las operaciones en los aeropuertos (De Vivo *et al.*, 2022). La saturación del suelo debido al incremento de la lluvia en períodos cortos en conjunto con una inadecuada capacidad de los sistemas de drenaje pluvial, aumentan la subsidencia del suelo provocando hundimientos en pistas y calles de rodaje (Dolman, 2016). Esto trae consigo una disminución de la capacidad operativa de la pista por cierres temporales repercutiendo en la reputación del operador aeroportuario e impactando en los usuarios en la demora de sus viajes. Las inundaciones en zonas aledañas a la instalación pueden interrumpir los accesos terrestres para los pasajeros y personal aeroportuario (Dolman *et al.*, 2021). Esto también incurre en gastos adicionales por el aumento de las labores de drenaje e inversiones en dichas estructuras (Mendoza & Marcos, 2017).

En la distribución de la lluvia en Cuba los ciclones tropicales juegan un papel muy importante. Sin embargo, las lluvias intensas y las inundaciones que provocan estos organismos han sido los factores destructivos que más frecuentemente han estado asociados con la afectación de incalculable valor económico, así como la pérdida de vidas humanas que han dejado a su paso de forma directa o indirecta en la geografía cubana (Jiménez *et al.*, 2014).

Los aeropuertos cubanos han sufrido importantes impactos asociados a las fuertes lluvias que acompaña a estos fenómenos. El paso del Huracán Frederic por el archipiélago cubano en septiembre de 1979 dejó significativos acumulados de lluvia a su paso. Las mayores inundaciones tuvieron lugar cerca de la laguna Ariguanabo, donde estaba localizada la textilera de igual nombre y el Aeropuerto Internacional “José Martí”, lo que provocó que fuera suspendido el tráfico aéreo (Martínez & Coca, 2020). En la modelación realizada por Martínez & Coca (2020), la cota máxima de inundación obtenida por modelación fue de 3.1 m y para la misma se reportaron profundidades de 3 m y más, tal y como reportó la tripulación rusa del IL-62 que se vio afectado por este fenómeno.

Más recientemente, se desarrolló en el mar Caribe la tormenta subtropical Alberto a finales del mes de mayo de 2018, en una latitud mucho más baja con respecto a la habitual para este tipo de tormenta (entre los 20°N y los 35°N). Su influencia en Cuba se caracterizó por producir lluvias torrenciales (De Armas & Boudet, 2019). No se recuerda que un ciclón subtropical haya influido en el comportamiento del tiempo en Cuba como lo hizo Alberto (CENCLIM, 2018).

La mayor afectación sobre Cuba fue las intensas lluvias de las bandas espirales situadas al primer y segundo cuadrante del meteoro que se mantuvieron 4 días prácticamente continuas en la región central del país. Producto de las mismas, se redujo la visibilidad horizontal en superficie notablemente (menos de 1 000 m) el día 26 cuando ocurrió su máxima afectación, sobre todo en los aeropuertos de Cayo Largo del Sur (durante 7 horas), Santa Clara y Nueva Gerona (ambos durante 1 hora). En los días que afectó Alberto a Cuba, los acumulados más significativos ocurrieron en los aeródromos de Santa Clara (374 mm), Cayo Largo del Sur (364 mm) y Cienfuegos (350 mm), todos de la región central del país (De Armas & Boudet, 2019).

Aumento de las temperaturas

Un aumento de la temperatura media traerá consigo alteraciones en el desempeño de las aeronaves y en las infraestructuras aeroportuarias (De Vivo *et al.*, 2022). En el caso de los aeropuertos, se producirán daños a los pavimentos de las pistas y calles de rodaje por las altas temperaturas (Cofel *et al.*, 2018). También se afectará al personal que labora en la zona aeronáutica del aeropuerto, ya sea por frío intenso en altas latitudes o calor intenso como en el caso de latitudes bajas (Monioudi *et al.*, 2018). Un aumento de la temperatura media conllevará a un incremento de los costos por un mayor uso de aire acondicionado en las instalaciones aeroportuarias (Monioudi *et al.*, 2018), así como de la demanda de servicios públicos locales (por ejemplo, agua y energía). También son posibles alteraciones de los equipos para la navegación (muchos de los cuales se encuentran a la intemperie) al no resistir las altas temperaturas (Mendoza & Marcos, 2017).

Las altas temperaturas afectan el desempeño de las aeronaves en las operaciones de despegue, pues a mayores temperaturas, el aire se vuelve menos denso y por tanto se reduce la eficiencia de los motores de las aeronaves (turbohélices) (Monioudi *et al.*, 2018). Esto conllevará a cambios en los patrones de la demanda de los usuarios y a reajustes de la programación de los vuelos, especialmente en los meses de verano (Mendoza & Marcos, 2017).

Martínez & Pérez (2019) realizaron un análisis de los escenarios futuros donde calcularon los rangos de temperatura máxima media y máxima absoluta y se determinaron sus incrementos por períodos hasta el 2080 en el Aeropuerto Internacional “José Martí”; concluyendo que las mismas se están incrementando en la actualidad y que dicho incremento continuará en el futuro. El estudio determinó que ciertas aeronaves modernas como el Boeing 737 800 u otras similares no sufrirán afectaciones significativas en el despegue. Sin embargo, otras aeronaves como los IL-96 (principal aeronave de la flota cubana), debido que no poseen motores tan eficientes como Boeing, pueden verse

afectados cuando la temperatura supere ciertos umbrales, provocando esto que los despegues sean abortados o pospuestos. Situaciones como esta se han presentado anteriormente en el Aeropuerto Internacional “José Martí”.

Desertificación

Las olas de calor provocan sequías en los suelos dentro y alrededor de los aeropuertos, y con el peligro potencial de generarse incendios forestales, los cuales han impactado la operación de las aeronaves en los aeropuertos (Mendoza & Marcos, 2017). Según Planos *et al.* (2013), el impacto del cambio climático sobre el archipiélago cubano se evidenciará, por la existencia de un clima cálido y extremo y con más zonas afectadas por la desertificación y la sequía. La disminución de las precipitaciones en contraste con el aumento de la evapotranspiración de referencia resultará en mayores áreas afectadas por la sequía, mayores áreas con presencia de condiciones de peligro de incendios para la vegetación y la aparición de áreas semiáridas y áridas (Planos *et al.*, 2013; Zamora *et al.*, 2022). Todo esto traerá como consecuencia prolongados e intensos períodos de estrés hídrico en los cultivos durante casi todo el año, lo cual crea las condiciones propicias para la aparición de más incendios forestales (Pérez *et al.*, 2016; Zamora *et al.*, 2022).

En Cuba, los incendios forestales en Pinares de Mayarí provocaron afectaciones en el Aeropuerto Internacional Frank País de Holguín. Según datos disponibles del Banco de Datos Climatológicos de la Oficina Principal de Vigilancia Meteorológica (<https://clima.aeronav.avianet.cu>), en los días 28 de febrero y 4 de marzo del año 2023, el aeropuerto se vio afectado por la presencia de nubes de humo provenientes de dicho incendio. Esto provocó una reducción de la visibilidad de hasta 3 km, poniendo al aeropuerto bajo los mínimos operacionales para vuelos VFR (Reglas de Vuelo Visual [“Visual Flight Rules”]).

Fenómenos climáticos extremos

En la actualidad fenómenos hidrometeorológicos y climáticos de diversa índole han generado impactos en los aeropuertos (Lindbergh *et al.*, 2022; Dolman, 2016). En altas latitudes, las tormentas invernales con excesiva caída de nieve han llevado al cierre total de los aeropuertos a no poder realizar la maniobra de despegue o aterrizaje de las aeronaves (Dolman *et al.*, 2021). Las temperaturas bajas han ocasionado el congelamiento de las pistas ocasionando despistes de aeronaves en algunos aeropuertos. Las ondas frías provocan cada vez más bancos de niebla cuya duración se extiende por horas y que interrumpe las operaciones aeronáuticas con cierres parciales, perdiendo operatividad del servicio los aeropuertos (Dolman, 2022).

En latitudes bajas y medias, la surgencia provocada por los ciclones tropicales provoca acumulaciones de agua y penetración del mar, que repercuten en inunda-

ciones de las pistas, calles de rodaje y los accesos terrestres a los aeropuertos, así como interrupción de los suministros y la pérdida de provisión de servicios públicos locales (por ejemplo, energía) (Monioudi *et al.*, 2018). Los fuertes vientos asociados a estos producen daños significativos en la infraestructura, instrumentos y aeronaves (Burbidge, 2018). Todo esto produce el cierre del aeropuerto y la interrupción de las operaciones aéreas por largos períodos de tiempo (Dolman, 2022).

En septiembre de 2017 el potente Huracán Irma bordeó durante 72 horas la costa norte de Cuba, donde causó la muerte a 10 personas y ocasionó daños en 13 de las 15 provincias (Cangialosi *et al.*, 2018). Los cayos de la costa norte de Cuba, por donde el ojo del huracán pasó más cerca, sufrieron graves daños materiales, en especial el aeropuerto de Jardines del Rey, la infraestructura hotelera y el “pedraplén”. La terminal aérea sufrió severos daños, se desplomaron techos y algunas paredes, se rompieron las escaleras mecánicas y las cintas de equipaje, las pasarelas de embarque y los locales comerciales dentro de la edificación principal quedaron severamente dañados. La pista de aterrizaje también sufrió daños y los árboles a su alrededor fueron completamente arrasados por los vientos de más de 250 km/h que arremetieron durante casi todo un día (Redacción Digital, 2017).

Aumento del nivel del mar

Para los aeropuertos que se encuentran emplazados muy cercanos a las costas o cuya cota de nivel es menor, un incremento del nivel del mar puede llevar a perder la infraestructura aeroportuaria (pistas, calles de rodajes, edificio terminal, etc.) y/o pérdida de los accesos terrestres, tales como carreteras costeras que conectan a la terminal aeroportuaria (Monioudi *et al.*, 2018). Un servicio aeroportuario inoperante por el impacto del nivel del mar conlleva a una disminución de la capacidad aeroportuaria (Ryley *et al.*, 2020). Ante un aumento del nivel medio del mar, los aeropuertos en zonas costeras son más vulnerables a los impactos de la surgencia provocada por organismos tropicales (huracanes, tormentas tropicales, etc.) En casos más extremos se deberán realizar modificaciones de rutas debido a la reubicación del aeropuerto (Dolman, 2022).

Los pronósticos climáticos indican un aumento del nivel del mar para el año 2050 menor a 30 cm y de casi un metro para el año 2100 en las zonas donde se encuentran los aeropuertos costeros de Cuba como son Playa Baracoa, Cayo Largo del Sur, Cayo Coco y Santiago de Cuba (Pérez, 2019). No existen hasta el momento estudios que demuestren que este aumento tendrá un impacto directo en los aeropuertos. Quizás no sea necesario reubicar instalaciones ni aeropuertos por esta causa, sin embargo, el mayor peligro al que se expondrán estos es al de una mayor surgencia producida por los organismos tropicales que afectan al territorio nacional.

Cambio Climático en Cuba. Tendencias y proyecciones

Las tendencias observadas demuestran que se está produciendo un cambio de un clima tropical húmedo (caracterizado por una temperatura promedio anual de 25.6 °C, con dos estaciones de precipitación bien definidas en las que se produce aproximadamente 1 400 mm anualmente, que serán recibidos en unos 100 días con lluvia) a un clima tropical subhúmedo (caracterizado por una temperatura promedio anual superior a los 30 °C y precipitaciones aproximadas de 1 000 mm anualmente, que serán recibidas en no más de 70 días con lluvia) (Planos *et al.*, 2013).

El Instituto de Meteorología de Cuba, ha descrito con detalle las variaciones y cambios del clima en el país y en la región del Caribe y, desde finales de 1990, viene generando escenarios del clima futuro, en correspondencia con las actualizaciones periódicas del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). En particular los escenarios de cambio climático, han sido la base para estudiar los impactos del clima cambiante en sectores y ecosistemas estratégicos: recursos hídricos (Planos *et al.*, 2013), zonas costeras y marinas (Garea, 2014), diversidad biológica (Pérez *et al.*, 2016), agricultura, usos de la tierra (Álvarez *et al.*, 2011) y asentamientos humanos y salud humana (Laguardia, 2017). Hoy en día existen proyecciones del clima futuro en Cuba, estimados para los escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5 los cuales han sido desarrollados con una resolución espacial apropiada para fines prácticos (Taylor *et al.*, 2013; Vichot *et al.*, 2019).

Los escenarios del clima futuro de Cuba estiman que la temperatura media puede elevarse hasta 4.5°C, con una disminución de la precipitación anual que oscilará entre el 15 y 63 %; acompañado del aumento de la evapotranspiración potencial y la evaporación

real. Se producirá una reducción de la cobertura nubosa, lo que implicará el aumento de la radiación solar (Instituto de Meteorología, 2015).

Atendiendo a los cambios obtenidos con el modelo PRECIS, se observa un considerable aumento de la temperatura media, mínima y máxima en todo el país con considerables diferencias entre escenarios (Figura 3, 4 y 5). El mayor aumento se tiene para la temperatura mínima en la zona de la costa sur oriental en el 2050 para el escenario RCP 8.5 de entre 3 y 3.5 °C. En esta zona se encuentran los aeropuertos de Manzanillo y Santiago de Cuba.

La mayor variabilidad se da para el caso de las precipitaciones (Figura 6). En el escenario RCP 2.6 se muestra una considerable disminución de las precipitaciones en casi todo el país para los años 2030 y 2050, mientras que para el RCP 8.5 un aumento. Este comportamiento ya fue encontrado por Zamora *et al.* (2022) en el período de 2020-2050.

En cuanto al aumento del nivel del mar, en la modelación del futuro escenario AICMI y el modelo MiniCamp, se obtuvieron resultados de ascenso del mar de 29.3 cm como promedio en el 2050 y de 95 cm en 2100 para 65 localidades costeras cubanas (Pérez, 2019). En este caso, solo los aeropuertos cercanos a las costas son los que presentarían problemas.

De manera general, los aeropuertos cubanos se enfrentarán a condiciones muy diferentes entre años de acuerdo a las diferentes condiciones climáticas, además de la posición geográfica en la que se encuentren, pues no todo el territorio nacional enfrentará de igual manera los efectos del cambio climático. Es por tanto que se debe intentar buscar estrategias de adaptación que analicen las condiciones locales de cada territorio y de cada instalación aeroportuaria.

Para el Aeropuerto Internacional “José Martí” los cambios en los valores de las temperaturas aumentan considerablemente a partir del 2050, alcanzando valo-

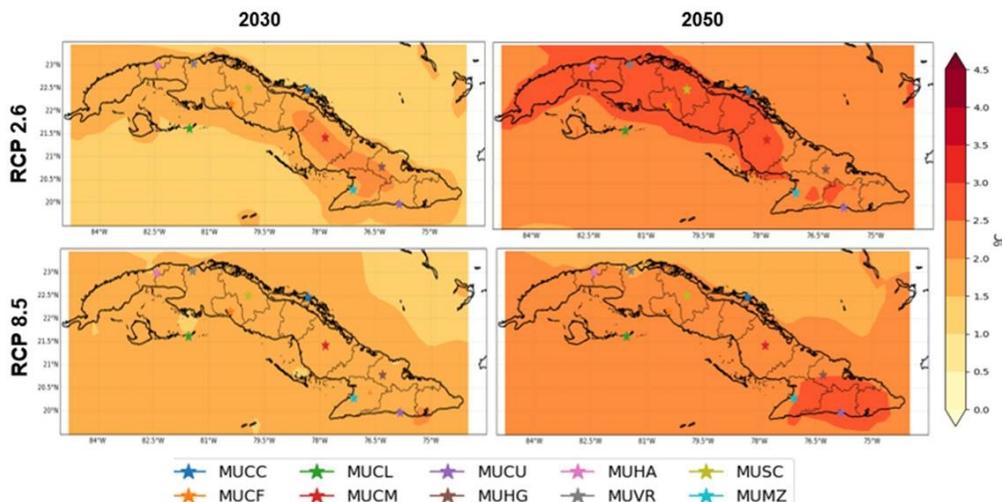


Figura 3. Cambios en la temperatura media (°C) para Cuba en los años 2030 y 2050 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 de acuerdo al período de referencia (1961-1990).

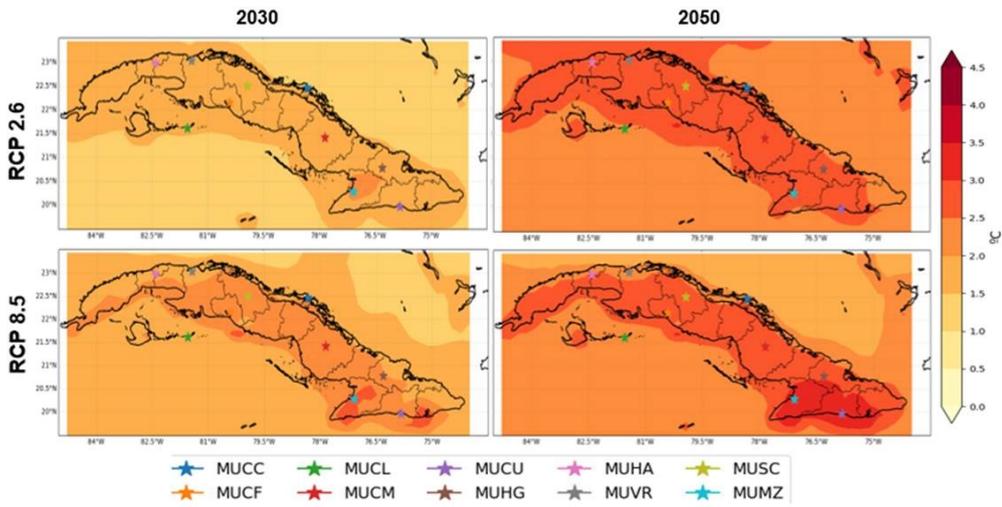


Figura 4. Cambios en la temperatura mínima (°C) para Cuba en los años 2030 y 2050 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 de acuerdo al período de referencia (1961-1990).

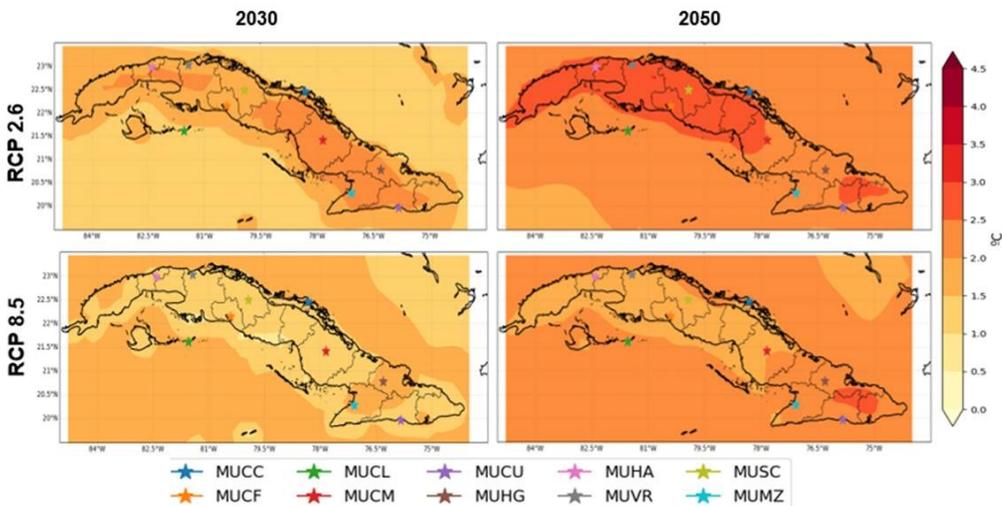


Figura 5. Cambios en la temperatura máxima (°C) para Cuba en los años 2030 y 2050 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 de acuerdo al período de referencia (1961-1990).

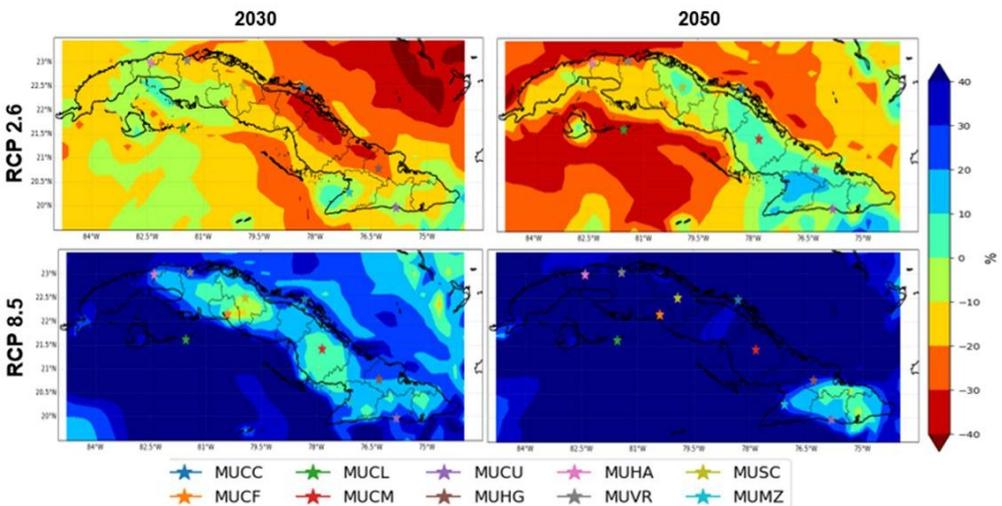


Figura 6. Cambios en el acumulado de precipitaciones (%) para Cuba en los años 2030 y 2050 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 de acuerdo al período de referencia (1961-1990).

res de más de 5 °C en el escenario RCP 8.5. Las precipitaciones se comportan de forma diferente, al haber una gran variabilidad entre años, aunque se encuentra una tendencia a la disminución en ambos escenarios. En, aproximadamente, el 24 % de los años la disminución supera o iguala el 10 % en el RCP 8.5, mientras que para el RCP 2.6 ocurre solo en el 6 % de los años (Figura 7).

Adaptación y mitigación al cambio climático. Resiliencia

Aumentar la resiliencia de los aeropuertos se puede dar a través de implementar medidas de adaptación, basados en dos enfoques, locales o regionales (Dolman & Vorage, 2020). La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, desarrolló una herramienta denominada Diagnóstico Operacional sobre los Riesgos al Clima de Aeropuertos (Airport Climate Risk Operational Screening, ACROS), la cual ayuda a los operadores de los aeropuertos a entender los impactos del cambio climático y como estos pueden afectar sus aeropuertos. Además, ACROS ayuda en el desarrollo de acciones de adaptación y su implementación dentro de los procesos de planeación de los aeropuertos existentes. Esta guía tiene la perspectiva de conocer y abordar los riesgos del cambio climático de un aeropuerto como un componente clave para la resiliencia del aeropuerto. Para ello se sugieren acciones para aumentar la resiliencia en los aeropuertos tales como (Dolman, 2022):

- Realizar estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo a nivel local y regional para implementar acciones de adaptación.

- Actualización de los estándares de construcción para edificios nuevos que incluyan consideraciones al cambio climático.
- Medidas de protección estructural que ayudan en disminuir los riesgos identificados en el aeropuerto (ejemplo: aumento de los espesores en los cristales, diques para evitar inundaciones, rediseño de las obras de drenaje para aumentar su capacidad, reacondicionamiento de estructuras en riesgo, incremento de la periodicidad de las labores de mantenimiento, etc.)
- Reubicación y relocalización de infraestructura aeroportuaria en el largo plazo que se encuentre en riesgo de acuerdo a los escenarios climáticos proyectados.
- Colaboración interinstitucional con los organismos de meteorología para activar planes de contingencia con base en los pronósticos del clima.
- Implementación de planes de atención de emergencia y de alerta temprana, los cuales ayudan a minimizar los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos al aeropuerto.
- Capacitación y formación en temas de cambio climático para las organizaciones y su personal, así como el involucramiento de las partes interesadas.

Propuesta de medidas de adaptación en el Aeropuerto Internacional “José Martí”

Cambios en la precipitación

Según Martínez & Coca (2020) un evento de lluvia intensa en el Aeropuerto Internacional “José Martí” como el provocado por el Huracán Frederic, tiene un

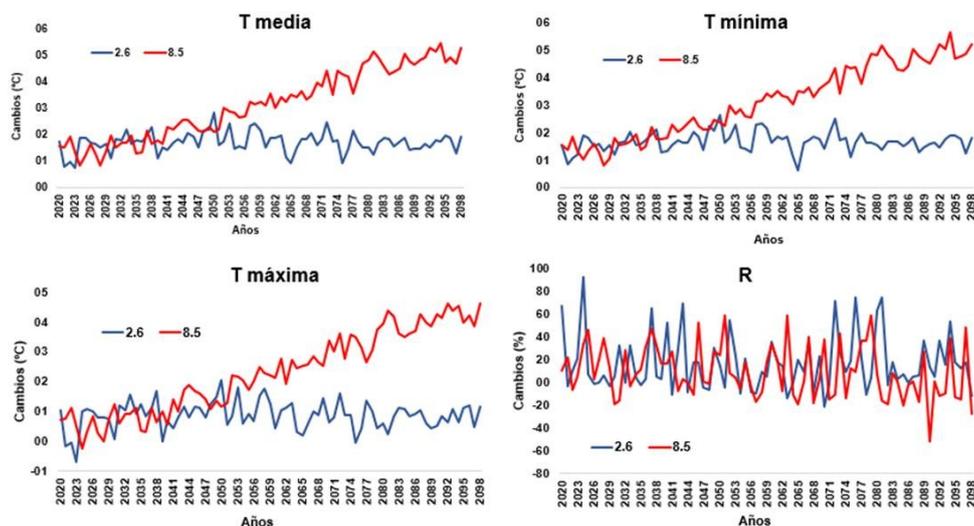


Figura 7. Cambios en las variables temperatura media (T media), temperatura mínima (T mínima), temperatura máxima (T máxima) y acumulado de precipitaciones (R) en el periodo de 2020-2098 de acuerdo al periodo de referencia (1961-1990) en el Aeropuerto Internacional “José Martí” (MUHA).

período de retorno de 10 años y una probabilidad de ocurrencia de un 10 %. La frecuencia y probabilidad de ocurrencia de este fenómeno pudieran aumentar por los efectos del cambio climático. De ocurrir ese evento con la infraestructura actual del aeropuerto, se afectarían las tres terminales existentes, con mayor impacto en las terminales 1 y 2. Además, las pistas y aquellas áreas para el parqueo de las aeronaves estarían seriamente afectadas.

La baja capacidad de drenaje de los suelos y la insuficiente capacidad de drenaje del Aeropuerto Internacional “José Martí” ante el paso de las tormentas con precipitaciones de gran magnitud y/o intensidad es un problema serio. La garantía de que el campo de pozos de infiltración funcione a plena capacidad, reduciría los daños como consecuencia de las inundaciones. Además, desde el punto de vista energético, se reduciría el consumo por este concepto ya que el tiempo de permanencia de las aguas sobre las instalaciones disminuiría notablemente al igual que tiempo de bombeo con bombas horizontales (Martínez y Coca, 2020). Por tanto, se recomienda establecer un plan de mantenimiento sistemático para el total de pozos de infiltración existentes (94), así como aumentar el número de los mismos y mantener una vigilancia sistemática de los niveles de las aguas subterráneas para un mejor drenaje en caso de lluvias intensas.

Aumento de las temperaturas

Ante el inminente aumento de las temperaturas se recomienda extender el estudio de Martínez y Pérez (2019) para el resto modelos de aeronaves de las compañías aéreas que operan en el aeropuerto y determinar los rangos de temperaturas que afectarían la eficiencia de estos aviones al momento de despegar. De ser necesario, se deberán realizar reajustes en la programación de los vuelos, atendiendo al horario del día y la época del año, con el fin de evitar accidentes o incidentes y elevar la seguridad, regularidad y eficacia de las operaciones aéreas.

Fenómenos climáticos extremos

Ante la posible ocurrencia de fenómenos extremos como huracanes de gran intensidad o tormentas locales severas con fuertes vientos, se recomienda actualizar los estándares de calidad para la construcción de nuevas infraestructuras en el aeropuerto y realizar modificaciones necesarias en las ya existentes, como utilización de materiales más resistentes, aumentar el grosor de los cristales de ventanas, etc. También se recomienda el desarrollo de nuevas técnicas y modelos de pronósticos más eficientes a corto y mediano plazo, que permitan la emisión de alertas tempranas y garanticen la toma de decisiones eficaces para la protección de los pasajeros, aeronaves y demás bienes.

Aumento del nivel medio del mar

Dado que el Aeropuerto Internacional “José Martí” se encuentra ubicado en una zona de llanura/llanura ondulada a 64 msnm, alejado de la costa (13 km aproximadamente) (AIP, 2014), el mismo no es vulnerable al aumento del nivel medio del mar y por tanto no es necesario tomar medidas de adaptación en este caso.

Desertificación

Según el informe de Dinámica Forestal del municipio Boyeros (2021), donde se encuentra el Aeropuerto Internacional “José Martí”, el territorio posee un total de 780.1 ha de patrimonio forestal, distribuidas en 417 ha de superficie boscosa (107.6 ha de bosque natural y 309.4 plantaciones existentes) y 46.2 ha de plantaciones jóvenes. El resto del área se divide en 13.1 ha de superficie deforestada y 303.8 ha de superficie inforestal. La tendencia del clima en Cuba es a la disminución las precipitaciones y de días con lluvias, lo que conllevará a más zonas afectadas por la aridez y la sequía, y mayores áreas con presencia de condiciones de peligro de incendios para la vegetación (Zamora et al., 2022). Por tanto, ante esta situación se recomienda realizar estudio de conjunto con los especialistas de Dinámica Forestal del municipio Boyeros, para la vigilancia de incendios forestales y pronósticos del movimiento de nubes de humo y cenizas que puedan afectar las operaciones de tránsito aéreo en el aeropuerto. Dado que no es una afectación común pero que puede tener una tendencia al aumento, también deberán realizarse acciones de capacitación del personal para mejorar la toma de decisiones.

Propuesta de acciones de mitigación

El aeropuerto de Cochin en La India se convirtió en el primer aeropuerto del mundo totalmente alimentado por energía solar mediante 48 154 paneles solares que producen alrededor de 12 megavatios diarios de energía. El aeropuerto solo consume entre 48 000 y 50 000 kilovatios de potencia. Los encargados del aeropuerto planean vender el excedente de energía, con esto, más el ahorro que representa no tener que pagar factura eléctrica, se estima que en 6 años aproximadamente, se recupere la inversión inicial de 9.3 millones de euros. No solo tienen un “aeropuerto verde” que no paga factura de electricidad, sino que representa un hito en el beneficio al medio ambiente que evitará la emisión de 300 000 toneladas métricas de carbono en los próximos 25 años (Segui, 2022).

El Aeropuerto Internacional “José Martí” es el principal aeropuerto de Cuba para la realización de vuelos internacionales y domésticos. Cuenta de momento con cinco terminales aéreas y varios edificios de servicio. La mayoría de estas instalaciones operan las 24 horas (AIP, 2014), por lo que el consumo de electricidad es

elevado y constante, lo cual representa una carga significativa para el Sistema Eléctrico Nacional. Actualmente en la Empresa Cubana de Navegación Aérea (emplazada en dicho aeropuerto) se ha realizado la compra de autos eléctricos para la transportación del personal, los cuales son “cargados” en dicha instalación. La dirección de dicha empresa ha planteado el proyecto de instalar paneles solares en los techos de los parqueos para la alimentación de estos vehículos. Acciones como esta se pueden extender al resto de edificaciones del aeropuerto, las cuales podrían instalar paneles solares en la cobertura de los techos y en áreas verdes aledañas que se encuentren en desuso. El monto de la inversión estará determinado por la cantidad de paneles que se puedan instalar y por el tipo de material fotovoltaico que estos utilicen. De este último factor también dependerá la eficiencia energética de los mismos y la cantidad de emisiones que se puedan evitar.

Por tanto, tomando como ejemplo el caso del aeropuerto de Cochin y teniendo en cuenta que el clima en Cuba tiene una tendencia a la disminución de la cobertura nubosa y que las modelaciones de los escenarios RCP pronostican un aumento en la radiación solar, con un forzamiento radiativo de hasta 8.5 W/m², se propone realizar una inversión para la instalación de paneles solares que permitan al aeropuerto generar su propia electricidad e independizarse gradualmente del Sistema Eléctrico Nacional.

Para el ahorro de energía eléctrica se recomienda hacer mayor uso de la iluminación natural, cambiar la iluminaria por bombillos LED de bajo consumo y utilizar luces inteligentes en lugares que lo requieran, como pasillos, baños, etc. También instalar sistemas de climatización independientes en cada oficina para hacer menor uso de los aires acondicionados centrales.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de la lista establecida por la OACI para la planificación de los aeropuertos en el enfrentamiento al cambio climático, se identificaron los peligros a los que están expuestos los aeropuertos cubanos y los futuros riesgos a partir del análisis de situaciones ocurridas con anterioridad.

De manera general, los aeropuertos cubanos se enfrentarán a condiciones muy diferentes entre años de acuerdo a las diferentes condiciones climáticas y de la posición geográfica en la que se encuentren. El Aeropuerto Internacional “José Martí” no es inmune a las posibles afectaciones, pues se evidencia un notable incremento en los valores de la temperatura y una disminución en los acumulados de precipitaciones.

Del análisis de las tendencias y proyecciones del clima se propusieron medidas de adaptación para los principales peligros asociados y acciones de mitigación al cambio climático, utilizando como ejemplo al Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo para los aeropuertos cubanos que permitan aumentar su resiliencia al cambio climático a partir de la aplicación de medidas de adaptación.

Se recomienda hacer un análisis de costo/beneficio de la instalación de paneles solares en el Aeropuerto Internacional “José Martí” como medida de mitigación.

AGRADECIMIENTOS

Se le agradece al Centro de Física de la Atmósfera por facilitar los escenarios de cambio climático para su posterior procesamiento y a los profesores Bárbara Garea y Orlando Rey por inspirar la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- ACI. 2019. Airport Business Continuity Management Handbook. Airport Business Continuity Management Handbook-ACI World Store.
- ACRP (Airport Cooperative Research Program). 2015. Report 147: Climate Change. Adaptation Planning: Risk Assessment for Airports.
- AIP. 2014. Publicación de Información Aeronáutica. Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba, 40 pp.
- Álvarez, A., Alicia Mercadet y col. 2011. El Sector Forestal Cubano y el Cambio Climático. Inst. Investig. Agro-Forestales, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba. 248 pp.
- Burbidge, R. 2018. Adapting aviation to a changing climate: key priorities for action. *J Air Transp Manag* 71:167-174. <https://doi.org/10.1016/j.jairtra.2018.04.004>.
- Cangialosi, J. P., Latto, A. S., & Berg, R. 2018. Hurricane Irma (AL112017). *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report*, 111.
- CENCLIM (2018). *Boletín de la Vigilancia del Clima*. 30(5). Centro del Clima. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba. ISSN-1029-2047.
- Coffel, E. D., Thompson, T. R., & Horton, R. M. (2017). The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. *Climatic Change*, 144(2), 381-388. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2018-9>
- De Armas-Echevarria, A. M., & Boudet-Rouco, D. 2019. Influencia en la navegación aérea de la tormenta subtropical Alberto en la Región de Información de Vuelo Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1), 38-45.
- De Vivo, C.; Ellena, M.; Capozzi, V.; Budillon, G. & Mercogliano, P. 2022. Risk assessment framework for Mediterranean airports: a focus on extreme temperatures and precipitations and sea level rise. *Natural Hazards* 111:547-566. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05066-0>

- Díaz-Zurita, A., Góngora-González, C.M., Lobaina-Laó, A., Pérez-Alarcón, A. y Coll-Hidalgo, P. (2021). Numerical wind forecast at mesoscale and short term for “José Martí” International Airport in Havana. *Revista Brasileira de Meteorologia* (36): 171-182.
- Dinámica Forestal del municipio Boyeros. 2021. Informe de trabajo.
- Dolman, N. & Vorage, P. 2020. Preparing Singapore Changi airport for the effects of Climate Change. *JOURNAL OF AIRPORT MANAGEMENT* 14(1): 54-66.
- Dolman, N. 2016. Creating water sensitive airports in times of climate change. Proceedings of the Singapore International Water Week (SIWW).
- Dolman, N. 2022. Enhance Climate Resilience for Airport Development. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/361250845>
- Dolman, N.; Sindhamani, V. & Vorage, P. 2021. Keeping Airports Open in Times of Climatic Extremes: Planning for Climate Resilient Airports. In: Brears R.C. (eds) *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42462-6_8
- Garea Moreda, B. (Coord.). 2014. Cambio climático y desarrollo sostenible. Bases conceptuales para la educación en Cuba. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Editorial Educación Cubana. La Habana, Cuba, 136 pp.
- Instituto de Meteorología 2015. Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto de Meteorología. La Habana.
- International Air Transport Association. 1995. Airport development reference manual. The Association.
- Jiménez M., Guadalupe L., Fuentes O. A., y Prieto R. 2014. Serie fascículo: ciclones tropicales. ISBN 978-970-821-001-0. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- Laguardia Martínez, J. 2017. Cambio climático: efectos y acciones de cooperación en las pequeñas islas del Caribe. *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina* 5(3): 46-65. RPNS 2346 ISSN 2308-0132.
- Lindbergh, S.; Reed, J.; Takara, M. & Rakas, J. 2022. Decoding climate adaptation governance: A sociotechnical perspective of U.S. airports. *Journal of Cleaner Production*. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.130118](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130118)
- Martínez Álvarez, M., & Pérez Suárez, R. 2019. Proyecciones de la temperatura máxima en el Aeropuerto Internacional José Martí de Cuba y su impacto en el despegue de las aeronaves. *Revista de Climatología*, 19.
- Martínez González, Y. & Coca Rodríguez, O. 2020. Modelación hidrodinámica de las inundaciones en el Aeropuerto Internacional José Martí. DOI: [10.13140/RG.2.2.36182.27205](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36182.27205)
- Mendoza Sánchez, J.F. & Marcos Palomares, O.A. 2017. Impacto del Cambio Climático en los Aeropuertos. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/344891979>
- Monioudi, I. Asariotis R, Becker A, Bhat C, Dowding-Gooden D, Esteban M, Feyen L, Mentaschi L, Nikolaou A, Nurse L, Phillips W, Smith D, Satoh M, Trotz UO, Velegrakis AF, Voukouvalas E, Vousdoukas MI, Witkop R. 2018. Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): the case of Jamaica and Saint Lucia. *Reg Environ Chang* 18:2211-2225. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1360-4>
- Pérez Montero, O.; Álvarez Adán, A. y Gómez Villa, Y. 2016. Cambio climático y vulnerabilidades en Cuba. En: *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación. Cap. 5. [Conde Álvarez, A. C. y López Blanco, J. (Coord.)].* pp 113-133. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México.
- Pérez-Parrado, R. 2019. Ascenso del nivel del mar en Cuba por Cambio Climático. *Revista Cubana de Meteorología*, 25 (1), 76-83.
- Planos, E.; Vega, R. & Guevara, A. (Edit). 2013. Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Medio Ambiente y Tecnología. La Habana, Cuba, 430 pp.
- Redacción Digital. 2017. Minuto a minuto: El paso del huracán Irma. Granma. Publicado el 10 de septiembre de 2017. Disponible en <https://www.granma.cu/cuba/2017-09-09/minuto-a-minuto-huracan-el-paso-del-huracan-irma-08-09-2017-08-09-46>.
- Ryley, T.; Baumeister, S. & Coulter, L. 2020. Climate change influences on aviation: a literature review. *Transp Policy* 92:55-64. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.010>
- Seguí, P. 2022. Primer aeropuerto totalmente alimentado por energía solar. *OVACEN*. <https://ovacen.com/aeropuerto-energia-solar/>
- Taylor, M.A.; Centella, A.; Charlery, J.; Bezanilla, A.; Campbell, J.D.; Borrajero, I.; Stephenson, T.S. y Nurmohamed, R. 2013. The PRECIS Caribbean story: lessons and legacies. *Bull Am Meteorol Soc*: 94, pp 1065-1073.
- Vichot-Llano, A.; Bezanilla-Morlot, A.; Martínez-Castro, D. y Centella-Artola, A. 2019. Estado actual de la aplicación de métodos de reducción de escala a las proyecciones de cambio climático en Centroamérica y el Caribe. *Rev. Cub de Met*: 25 (2), pp. 218-237. E-ISSN: 0864-151X.

Zamora Fernández, M.A. 2020. Impacto del cambio climático en la generación de incendios forestales en Las Tunas. Tesis presentada en opción al título de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Universidad de La Habana. La Habana, Cuba.

Zamora Fernández, M.A.; Azanza Ricardo, J. & Bezanilla Morlot, A. 2022. Impacto del cambio climático en la generación de incendios forestales en Las Tunas. CFOREs 10(2):150-168. ISSN: 1996-2452 RNPS: 2148. <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/podium/article/view/729>