

Climatología Aeronáutica 2005-2024

Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma

Adriana M. Mora Pérez, Diego Garro Molina

En este documento se presenta la climatología aeronáutica del Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma para el periodo 2005-2024. Se toman los datos incluidos en los Reportes Meteorológicos de Aeródromo (METAR) desde las 12:00UTC a las 00:00UTC (periodo de operatividad del aeropuerto), los cuales se registran a partir de las observaciones realizadas por los funcionarios de la Oficina de Meteorología Aeronáutica del AITBP y las Estaciones Meteorológicas Automáticas instaladas en el aeródromo. Las variables a analizar corresponden a viento, temperatura, punto de rocío, presión, visibilidad y fenómenos de tiempo presente. Según su ubicación, el AITBP pertenece a la región climática del Valle Central de Costa Rica, por lo que presenta una estación seca bien definida. La información presentada a continuación facilita la toma de decisiones operativas y económicas por parte de las autoridades a cargo del aeropuerto y permite el cumplimiento de lo establecido en el Anexo 3 y RAC03.

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones meteorológicas adversas, como tormentas, niebla, fuertes vientos y lluvias intensas, tienen un impacto directo en la seguridad y eficiencia de las operaciones aeronáuticas. Estas condiciones pueden provocar retrasos, desvíos de vuelos, interrupciones en la programación y riesgos operacionales. Como lo indica la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI; 2018), el servicio meteorológico para la navegación aérea internacional tiene como objetivo contribuir a la seguridad operacional, la regularidad y la eficiencia de las operaciones.

En el caso del Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma (AITBP), estas condiciones se abordan mediante el Plan de Emergencias Aeroportuarias, que establece procedimientos específicos para gestionar los riesgos asociados con las operaciones

¹ Meteoróloga. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional.

² Meteorólogo. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional.

aéreas, incluyendo la gestión de alertas tipo 1, que corresponden a condiciones meteorológicas desfavorables para la operatividad de los aeropuertos (DGAC, 2022).

Contar con información climatológica precisa y específica para el aeródromo es esencial para la planificación de las operaciones aeronáuticas. Esto permite conocer las condiciones meteorológicas típicas y la frecuencia con la que se presentan fenómenos meteorológicos en el aeródromo durante un periodo determinado, lo que es fundamental para la elaboración de pronósticos específicos y para la toma de decisiones (Escrig-Barbera et al., 2013; OACI, 2009).

En el Decreto Ejecutivo N° 42679 (2020), la Dirección General de Aviación Civil de Costa Rica (DGAC) establece que la información climatológica necesaria para la planificación de operaciones debe ser proporcionada a los usuarios del aeropuerto. Esto garantiza una operación segura y eficiente, especialmente en un aeropuerto como el AITBP, que es el principal centro de formación de pilotos en Costa Rica (Carballo-Arce, 2022).

La elaboración de una climatología específica para el AITBP aporta múltiples beneficios entre los que están:

- ✓ Optimización de recursos: Permite una planificación más eficiente de vuelos y operaciones aeroportuarias.
- ✓ Mejora en la seguridad: Reduce los riesgos asociados a fenómenos meteorológicos no previstos.
- ✓ Cumplimiento normativo: Responde a las directrices establecidas por la DGAC y la OACI, asegurando que los usuarios del aeropuerto reciban información meteorológica actualizada y confiable.
- ✓ Sostenibilidad: Minimiza el consumo innecesario de combustible y los costos operativos asociados a desvíos o retrasos.

Entre 2018 y 2022, el AITBP fue el segundo aeropuerto más transitado de Costa Rica, (DGAC, 2023). Esto resalta la necesidad de disponer de una climatología precisa que contribuya a mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones.

El Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma (AITBP) se encuentra en el distrito de Pavas, en la provincia de San José, una región con clima tropical. Este patrón climático afecta directamente las operaciones del aeropuerto, especialmente durante la

temporada de lluvias, cuando los fenómenos meteorológicos adversos son más intensos y frecuentes (Ministerio de Obras Públicas y Transportes [MOPT], 2011; IMN, 2008).

El propósito de desarrollar una climatología para el AITBP es proporcionar un compendio detallado de las condiciones meteorológicas en el área aeroportuaria, siguiendo las directrices del Anexo 3 de la OACI y el RAC03 de la DGAC. Este recurso permitirá:

- ✓ Facilitar la elaboración de pronósticos específicos.
- ✓ Mejorar la toma de decisiones operativas.
- ✓ Garantizar una planificación eficiente y segura para las operaciones aéreas diarias.

1.1 CLIMA DEL VALLE CENTRAL

El AITBP se encuentra en la región climática del Valle Central de Costa Rica, específicamente en su parte occidental, la cual está influenciada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, los vientos ecuatoriales y los alisios (IMN, 2008; Suárez y Rivera, 2021). Esta región se caracteriza por presentar dos estaciones claramente diferenciadas: una estación seca, que va de diciembre a marzo, y una estación lluviosa, de mayo a octubre. Los meses de abril y noviembre corresponden a períodos de transición. Además, se observan dos períodos de disminución de precipitaciones: uno a finales de junio, conocido como el veranillo de San Juan, y otro entre julio y agosto, denominado canícula o sequía de medio verano (IMN, 2008, Solano, 2015). Durante los meses de marzo y abril se registran las temperaturas máximas en el Valle Central (IMN, 2008), periodo en el cual la radiación solar es mayor, debido a que la incidencia del sol es más directa por la presencia de poca nubosidad.

En esta región predominan los vientos alisios desde noviembre hasta abril y nuevamente entre julio y agosto (Suárez y Rivera, 2014), los cuales son impulsados por la interacción de masas de aire frío, la variabilidad del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte y los máximos de intensidad de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Amador, 2008; Chinchilla et al., 2016; Duran-Quesada et al., 2020, Castillo y Amador, 2020). Durante los meses de mayo-junio y septiembre-octubre, el viento alisio se debilita, lo cual ocurre debido a que la temperatura superficial del mar en la piscina de agua cálida

del Mar Caribe alcanza su desarrollo máximo durante estos meses, induciendo una baja presión relativa con respecto al Pacífico Tropical del Este (Alfaro et al, 2024). Debido a esto, por las tardes, los vientos predominantes provienen del oeste y se genera convergencia en bajo nivel entre los flujos de viento del oeste y del este, favoreciendo la formación de lluvias intensas y tormentas eléctricas (IMN, 2008; Suárez y Rivera, 2014).

En cuanto a la época lluviosa, septiembre y octubre son los meses con mayor precipitación. Este comportamiento está asociado a la cercanía de la Zona de Convergencia Intertropical al país, el mayor transporte de humedad desde el Pacífico, el calentamiento diurno y la influencia de sistemas atmosféricos regionales, como ondas del este y su evolución a sistemas ciclónicos, que favorecen la actividad convectiva y la convergencia en niveles bajos (IMN, 2008; Alfaro, Quesada y Solano, 2010).

2. METODOLOGÍA

Los datos meteorológicos se obtuvieron de los informes METAR emitidos de manera horaria por la Oficina de Meteorología Aeronáutica (OMA) del AITBP, operada y gestionada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN; DGAC, 2020). Los registros corresponden al periodo comprendido entre las 12:00 UTC y las 00:00 UTC, que abarca el rango horario de operación del aeropuerto. El análisis de este periodo permite una evaluación detallada de las condiciones atmosféricas durante el día, lo que resulta fundamental para garantizar la precisión del análisis climático y la seguridad operacional en la terminal aérea. El estudio abarca los años 2005 a 2024, cumpliendo con lo estipulado por el Decreto Ejecutivo N° 42679 (2020), que establece que la información climatológica debe basarse en observaciones efectuados por un mínimo cinco años. Los datos de METAR son obtenidos y codificados de acuerdo con las directrices establecidas en el Anexo 3 de la OACI (2018). Las variables a analizar corresponden a:

- Dirección, velocidad y ráfagas de viento.
- Visibilidad.
- Fenómenos de tiempo presente.
- Nubosidad.

- Temperatura.
- Temperatura de rocío.
- Presión atmosférica.

La descripción de emplazamiento de los instrumentos que conforman la Estación Meteorológica Automática, utilizados para la medición de las variables de viento, temperatura del aire, temperatura de rocío y presión atmosférica, se presenta en la Tabla 1. Para estas variables, se calcularán los promedios tanto mensuales como horarios por mes, lo que proporcionará una visión general de las condiciones climáticas predominantes en cada intervalo temporal y permitirá evaluar su variación estacional.

Tabla 1. Características del emplazamiento de la Estación Meteorológica Campbell Oeste del AITBP. Fuente: IMN.

Tipo de Sensor	Emplazamiento (m)
Anemómetro Veleta	10
Temperatura Humedad relativa	2
Presión Atmosférica	1.5
Precipitación	1.5

Por otro lado, las variables de visibilidad, fenómenos de tiempo presente y nubosidad son obtenidas a través de las observaciones realizadas por los funcionarios de la Oficina de Meteorología Aeronáutica (OMA). Para estas variables, se analizará la frecuencia de los casos registrados, tanto por mes como por hora, lo que permitirá evaluar la ocurrencia y distribución temporal de eventos meteorológicos significativos. Los casos de visibilidad se contarán cuando esta sea inferior a 5000 m, los de nubosidad cuando el techo de nubosidad sea inferior a 1500 ft y los fenómenos de tiempo presente se consideran dentro del aeródromo cuando se ocurran a menos de 8 km del punto de observación.

Además, se realizará un análisis complementario de las temperaturas extremas y la cantidad de precipitación registrada mensualmente, lo que aportará información sobre

las condiciones meteorológicas extremas y la distribución de las precipitaciones a lo largo del año.

Este análisis se llevará a cabo utilizando Python y sus bibliotecas estadísticas y de análisis de datos, lo que permitirá un procesamiento eficiente y detallado de la información.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

a) Climograma

En la figura 2 se presenta el climograma del AITBP para el periodo 2010 y 2024. La temperatura máxima promedio se presenta en el rango de 28.7 °C y 31.0 °C y su valor más alto se registra en el mes de abril y el valor mínimo en enero, mientras que la temperatura mínima promedio presenta valores en el rango de 15.5 °C y 16.8 °C, donde el valor más bajo registrado ocurre en febrero.

Por otra parte, los meses con menor registro de precipitación se presentan entre diciembre y marzo, periodo en donde se presenta menos del 3% de la precipitación anual. Abril y noviembre, al ser época de transición, presentan acumulados inferiores a 150 mm mensuales. En contraste, entre mayo y octubre se registra la mayor cantidad de precipitación, con valores máximos de aproximadamente 284 mm en setiembre y 295 mm en octubre, además, se reportan la mayor cantidad de días con precipitación, alcanzando 25 días reportados. Por otro lado, el mes de julio presenta una disminución de precipitación con montos de 150 mm, lo cual corresponde al periodo canicular de la región. Este comportamiento es consiste con la climatología que se presenta en la región del Valle Central, donde se puede definir una estación seca, entre noviembre y marzo, y una estación lluviosa, entre mayo y octubre.

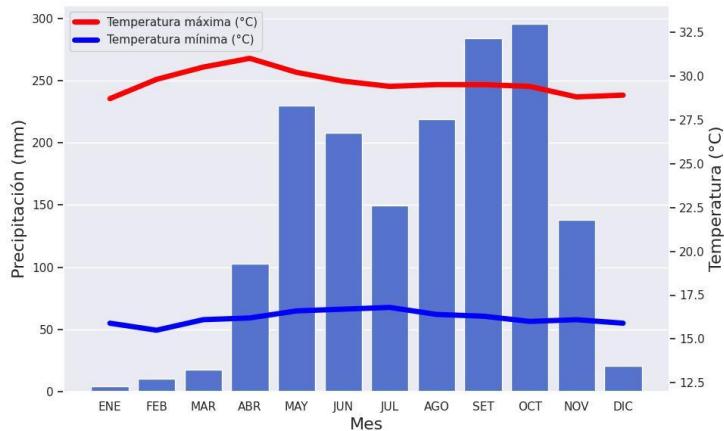


Figura 1. Climograma AITBP, 2010-2024. Fuente: Elaboración propia.

b) Presión

En los informes METAR se notifica el valor del QNH (OACI, 2018), el cual corresponde al valor de la presión a la que debe ajustarse el altímetro de una aeronave para que indique la elevación del aeródromo cuando la aeronave se encuentre posada sobre el suelo de este (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018). Esta se notifica en hectopascales (hPa) o en pulgadas de Mercurio (in Hg). En la figura 2, se observa un comportamiento irregular en la presión atmosférica (QNH) a lo largo del año, lo que se debe a la influencia de los sistemas de gran escala que afectan a Costa Rica, como los empujes fríos, la NASH, ciclones tropicales y bajas presiones (IMN, 2008; Chinchilla et al., 2016). Los meses con mayores valores de presión corresponden a enero, febrero y marzo, con promedios mensuales por encima de los 30.01 in Hg, mientras que en julio se observa un máximo local en la presión, con valores cercanos a los 30.007 in Hg. Por otro lado, en Costa Rica, durante octubre y, en menor medida, en noviembre se muestra una mayor influencia de ciclones tropicales, lo que se refleja en una disminución de la presión en el AITBP con valores que rondan los 29.99 in Hg (figura 2).

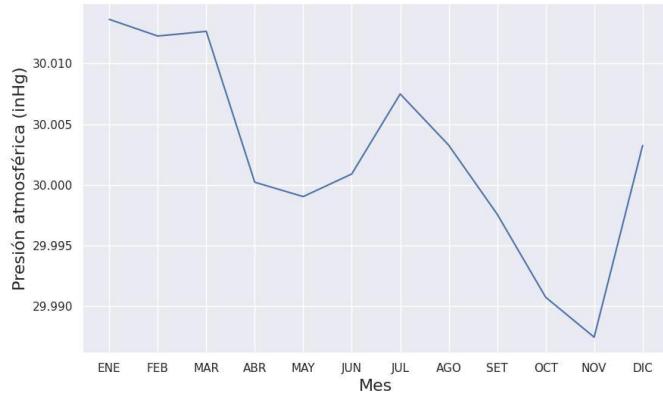


Figura 2. Variación mensual de la presión (QNH) media para AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la variación semidiurna de la presión atmosférica en el AITBP sigue un ciclo de aproximadamente 12 horas (Figura 3), con un aumento de la presión durante las primeras horas de la mañana, alcanzando su valor máximo alrededor de las 09:00 tiempo local (TL) (Figura 4). Posteriormente, la presión disminuye a lo largo del día, con su punto más bajo hacia las 15:00 TL. Este comportamiento refleja una oscilación semidiurna típica, con fluctuaciones regulares en la presión. El aumento de la presión en la mañana está relacionado con el calentamiento solar, que provoca la expansión térmica de la atmósfera (Dai y Wang, 1999). Durante la tarde, a medida que la radiación solar disminuye, la atmósfera se enfriá y se contrae, lo que favorece una reducción en la presión. Estos procesos, junto con la conducción ascendente del calor desde el suelo, generan ondas de gravedad internas en la atmósfera, las cuales causan oscilaciones diurnas en el campo de presión atmosférica (Dai y Wang, 1999). A lo largo del año, los valores máximos de presión en el aeropuerto oscilan entre los 30.02 y 30.06 in Hg, mientras que los valores mínimos fluctúan entre los 29.92 y 29.98 in Hg (Figura 3).

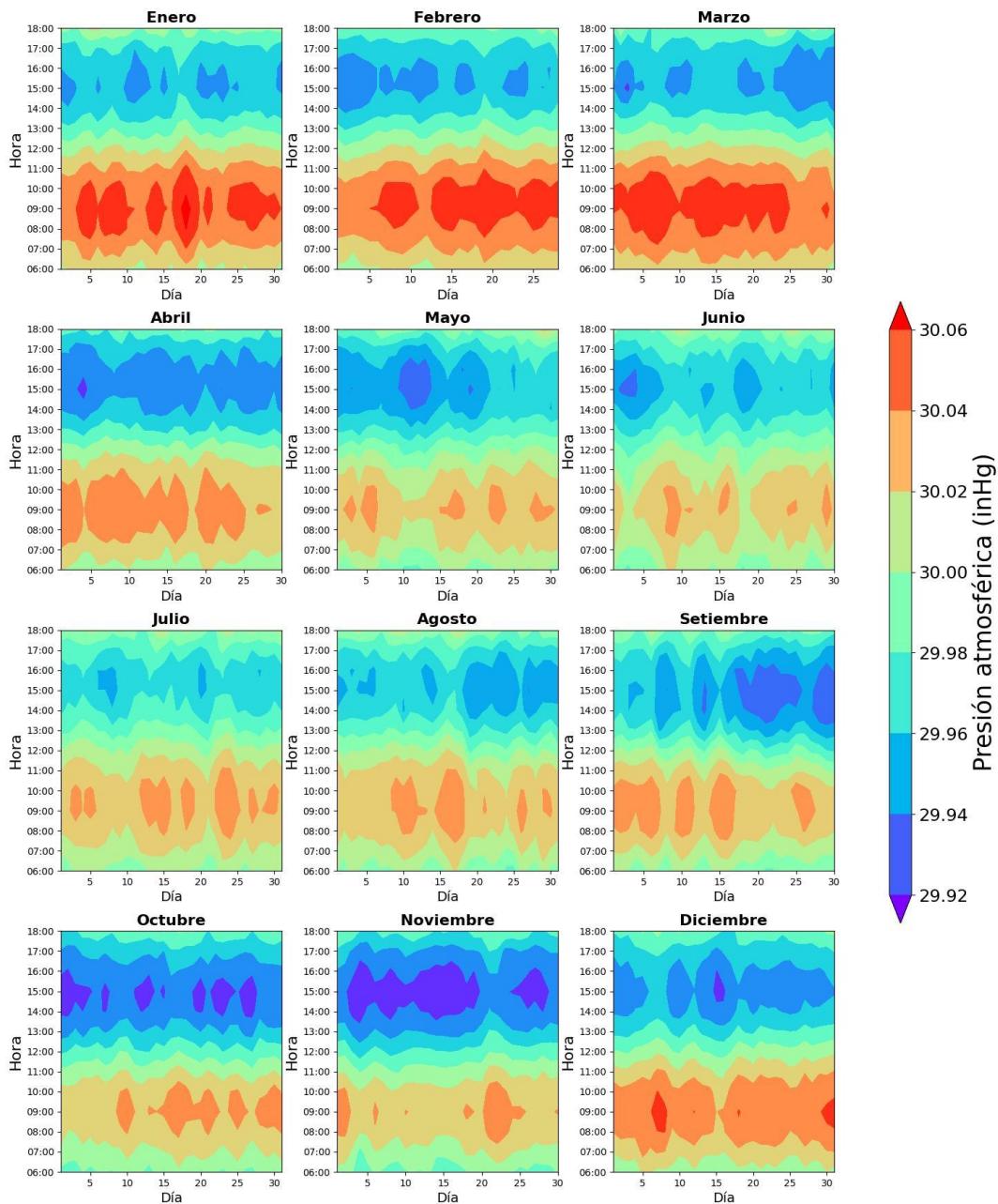


Figura 3. Distribución media diaria de la presión (QNH) media para AITBP, 2005-2024.

Fuente: Elaboración propia.

c) Viento

Para este trabajo se analizan las variables de velocidad, dirección y ráfagas de viento con base en los datos obtenidos de los informes METAR. Según OACI (2018), para el caso de los informes METAR, la dirección y velocidad del viento reportada corresponde al promedio de los 10 minutos anteriores a la hora del reporte. Entre los meses de diciembre y marzo, se registran las mayores intensidades de viento en el Aeropuerto Tobías Bolaños, con velocidades promedio diarias que oscilan entre los 8 y 18 nudos (kt) durante el periodo de operación (figura 4). Este incremento en la intensidad del viento es resultado de la interacción de varios fenómenos atmosféricos, como el Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés), y el aumento de la presión, el cual se discutió en la sección anterior.

El CLLJ presenta una distribución bimodal, con su máxima intensidad en febrero y un pico secundario en julio (Amador, 2008). Este comportamiento contribuye a que febrero sea el mes más ventoso en el Aeropuerto Tobías Bolaños, con velocidades promedio diarias cercanas a los 13 kt, mientras que en julio se observa un máximo local con valores promedio de aproximadamente 8 kt (figura 5). Así mismo, esto se relaciona con los meses donde se presentan las ráfagas de viento más intensas, las cuales para efectos de aeronáutica se notifican cuando la velocidad máxima del viento es 10 kt mayor que la velocidad promedio en un intervalo de tiempo de 10 minutos (OACI, 2018). Durante febrero, las ráfagas promedio presentan valores cercanos a los 26 kt, mientras que en julio es de aproximadamente 23 kt (figura 6). Durante los meses de diciembre a abril y en julio la componente predominante es del E y SE, asociada a la influencia de los vientos alisios (figura 7).

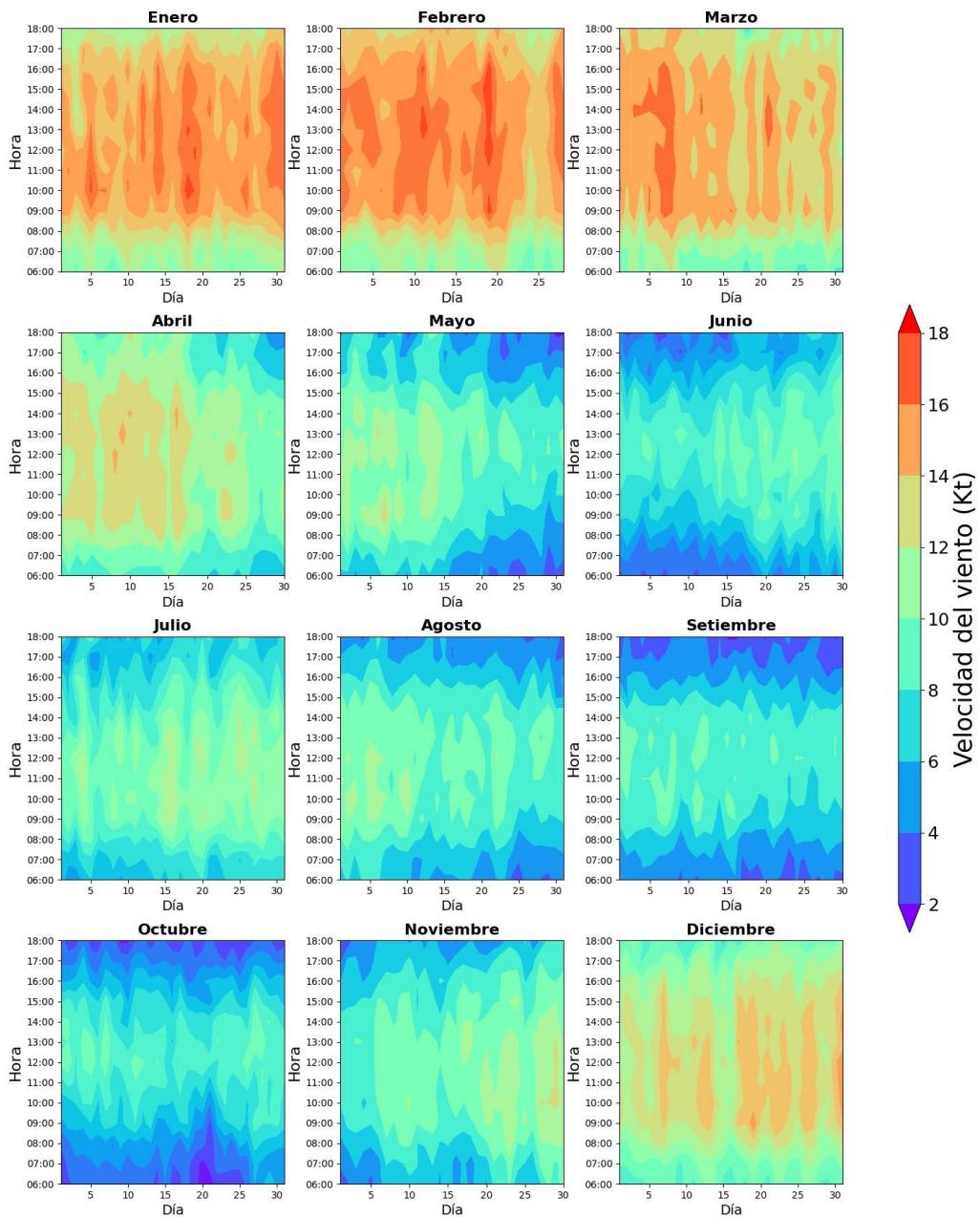


Figura 4. Distribución media diaria de la velocidad del viento horario para AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

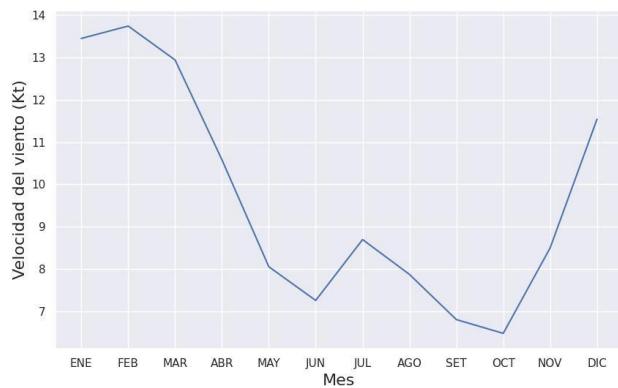


Figura 5. Variación mensual de la velocidad media del viento para AITBP, 2005-2024.

Fuente: Elaboración propia.

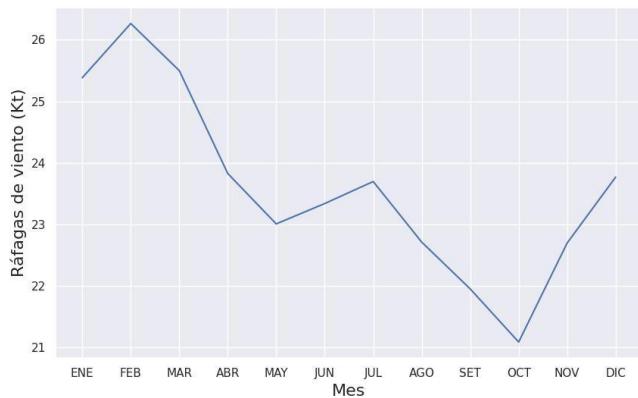


Figura 6. Variación mensual de la ráfaga máxima del viento para AITBP, 2005-2024.

Fuente: Elaboración propia.

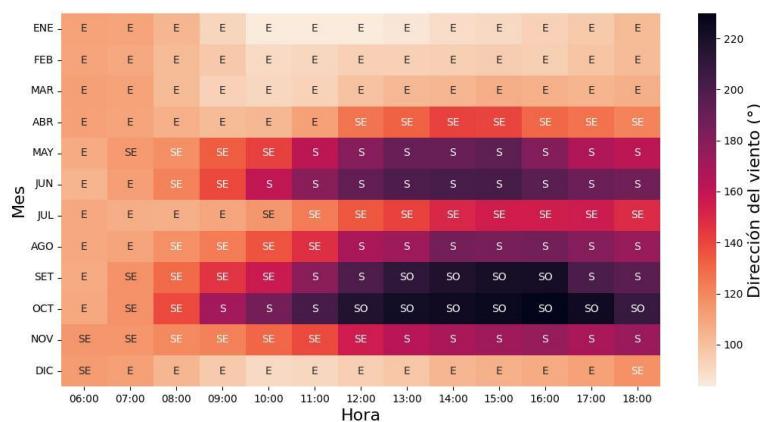


Figura 7. Mapa de calor mensual durante las horas de operación del aeropuerto para la dirección del viento en AITBP, 2005-2023. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los meses de setiembre y octubre son los menos ventosos, con velocidades que varían a lo largo del periodo de estudio entre los 2 y 12 kt (figura 4). Durante estos meses, la componente predominante del viento es del S-SO (figura 7), lo cual es conocido como oestes ecuatoriales (Alfaro et al, 2024). Estas componentes predominan desde aproximadamente las 09:00 TL y se mantiene constante hasta el final del periodo, mientras que las primeras horas de mañana predomina viento del E-SE.

Según la climatología del Valle Central de Costa Rica, abril y noviembre son meses de transición entre la época seca y la lluviosa. Este cambio se refleja también en la dirección del viento. En abril, la primera quincena se caracteriza por vientos del E y SE a lo largo del día, mientras que en la segunda quincena varía del E al SO. Por otra parte, en noviembre, la primera quincena presenta vientos entre E y O, y en la segunda, E y S (figura 8).

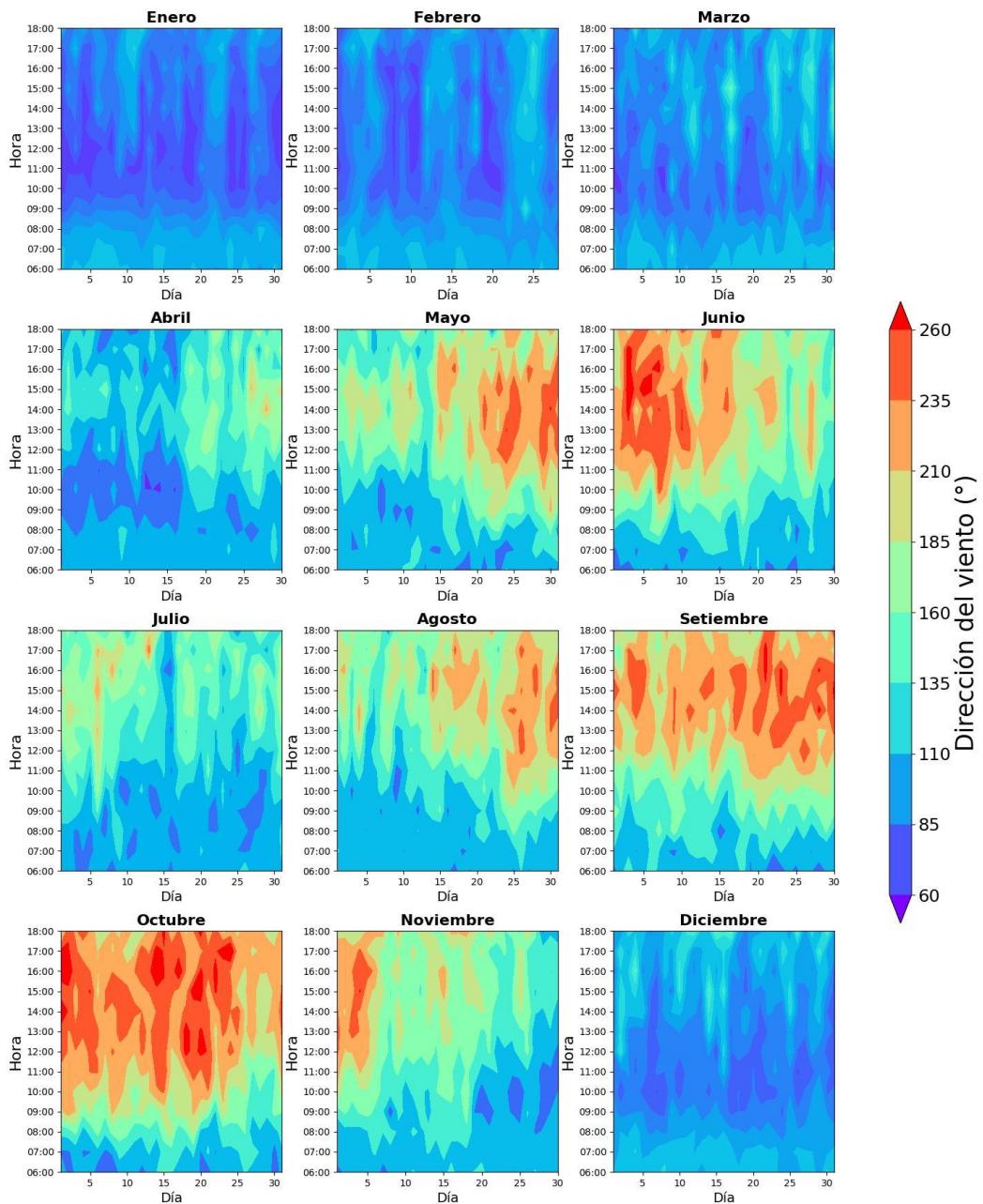


Figura 8. Distribución media diaria de la dirección del viento horario en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

d) Temperatura

En los informes meteorológicos de aeródromo, la temperatura del aire y la temperatura de rocío se reportan en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y se expresan de forma escalonada en unidades enteras (OACI, 2018). En la Figura 1 se muestra que, para el Aeródromo AITBP, el mes con las temperaturas más altas corresponde a abril, con promedios diarios de

24.5°C (figura 9). Además, abril marca el final de la época seca, por lo que, al presentar condiciones más nubladas que los meses previos, se observa un menor enfriamiento nocturno y una acumulación más significativa de calor durante el día. En contraste, la temperatura promedio más baja se registra en noviembre, con un promedio mensual de 22.75°C (figura 9). Esto se debe a que la presencia de nubosidad, así como fenómenos de hidrometeoros en suspensión, limitan el calentamiento diurno, siendo uno de los meses con menor amplitud térmica diaria (figura 1).

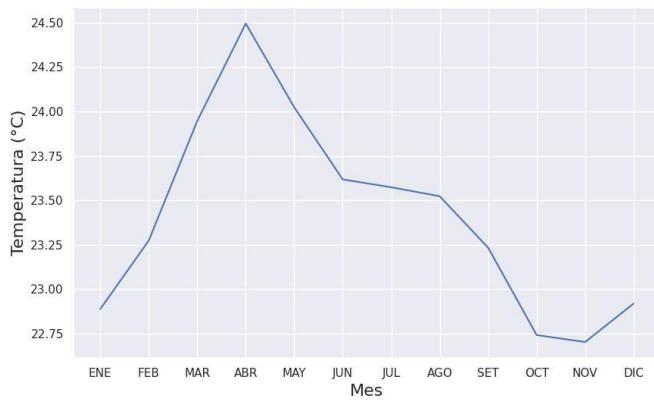


Figura 9. Variación mensual de la temperatura del aire por mes para AITBP, 2005-2024.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, el comportamiento diurno de la temperatura está estrechamente asociado a las variaciones inducidas por el forzamiento solar, donde las temperaturas mínimas se registran alrededor de las 06:00 TL, mientras que las máximas se alcanzan entre las 11:00 y las 14:00 TL (figura 10), patrón que coincide con los resultados obtenidos por Betts y Ball (1995) para Wichita, Kansas, donde se establece que la temperatura mínima en superficie ocurre antes del amanecer y las máximas se presentan entre una y dos horas después del mediodía local.

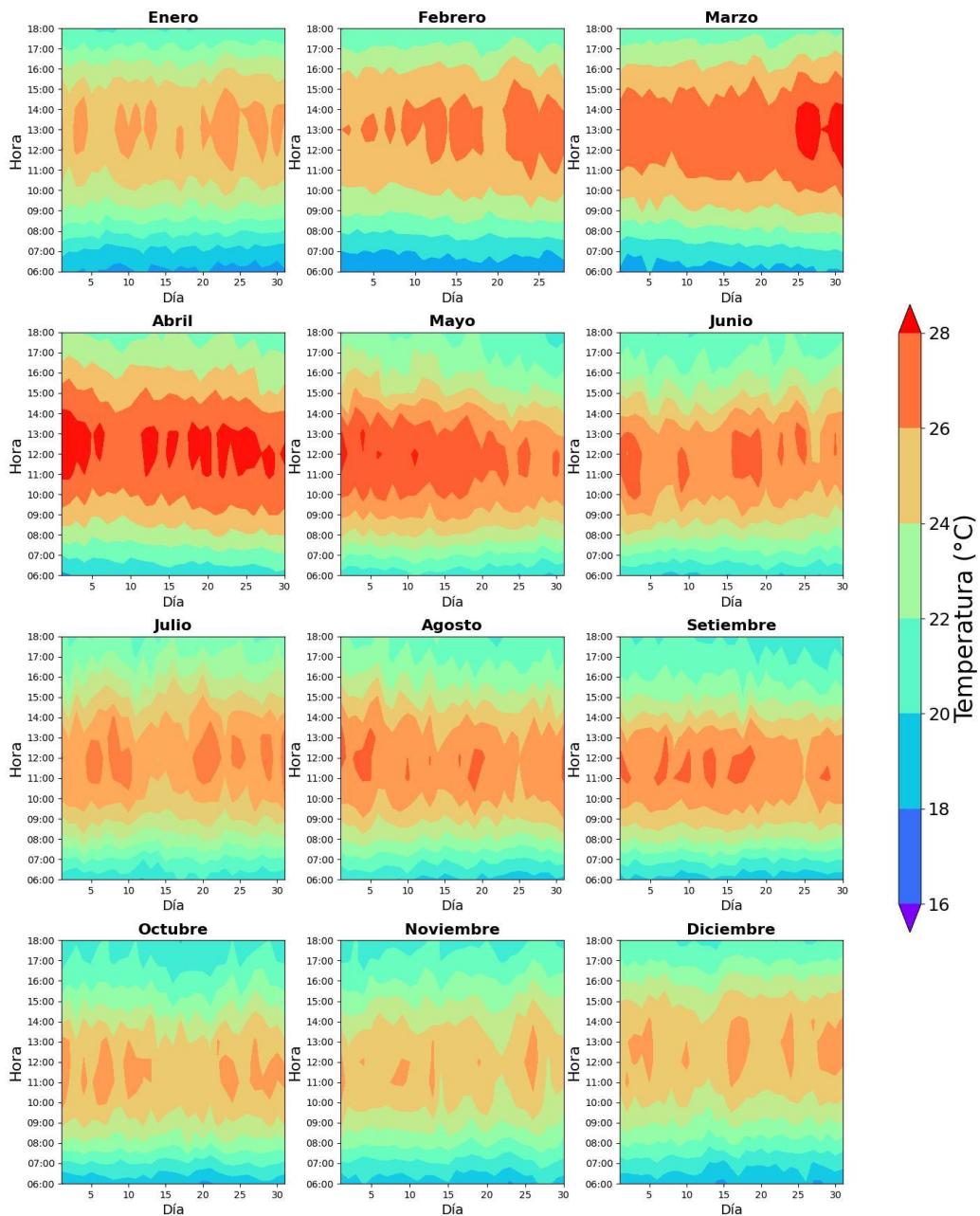


Figura 10. Distribución media diaria de la temperatura horaria para AITBP, 2005-2024.

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el punto de rocío, se observan los valores más elevados, superiores a 17.5°C, durante mayo a octubre (figura 11). Estos valores coinciden con los períodos de temperaturas del aire más bajas, lo que sugiere que estos meses corresponden a los de mayor humedad, coincidiendo con la temporada lluviosa de la región. Este comportamiento se presenta en la figura 1 donde los mayores acumulados mensuales

de precipitación son mayores durante este intervalo. Las precipitaciones frecuentes durante esta época favorecen el aumento del punto de rocío. Sin embargo, durante julio, se presenta una leve disminución en el valor promedio del punto de rocío, el cual corresponde con la canícula. Por otra parte, durante la época seca, de diciembre a marzo, el valor del punto de rocío presenta valores por debajo de los 16°C, lo que coincide con los meses más cálidos y menos húmedos.

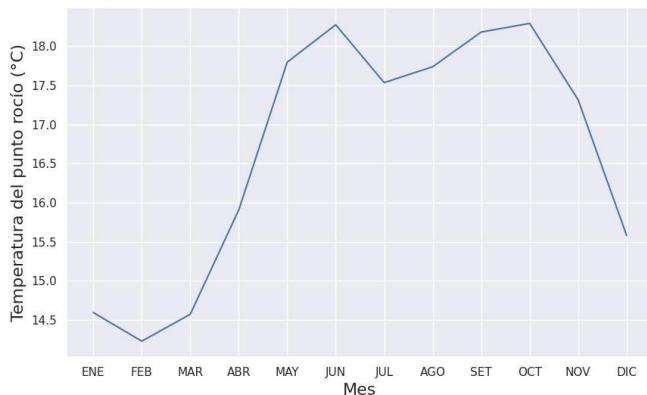


Figura 11. Variación mensual de la temperatura del punto de rocío por mes para AITBP, 2005-2023. Fuente: Elaboración propia.

Según Mora (2020), durante parte de época lluviosa del 2004 en el Valle Central la precipitación máxima alcanza los valores máximos entre las 14:00 y las 17:00 TL. Esto corresponde con los máximos del punto de rocío, los cuales se registran después de las 12:00 TL en la época lluviosa, con valores superiores a los 18°C (figura 12). Por el contrario, los mínimos en el punto de rocío se registran en las primeras horas de la mañana de la época seca, correspondiendo con los períodos donde la humedad relativa es reducida debido a la ausencia de lluvias y nubosidad y la mayor radiación solar, que provoca la evaporación del agua (Rosales-Flores, 2023).

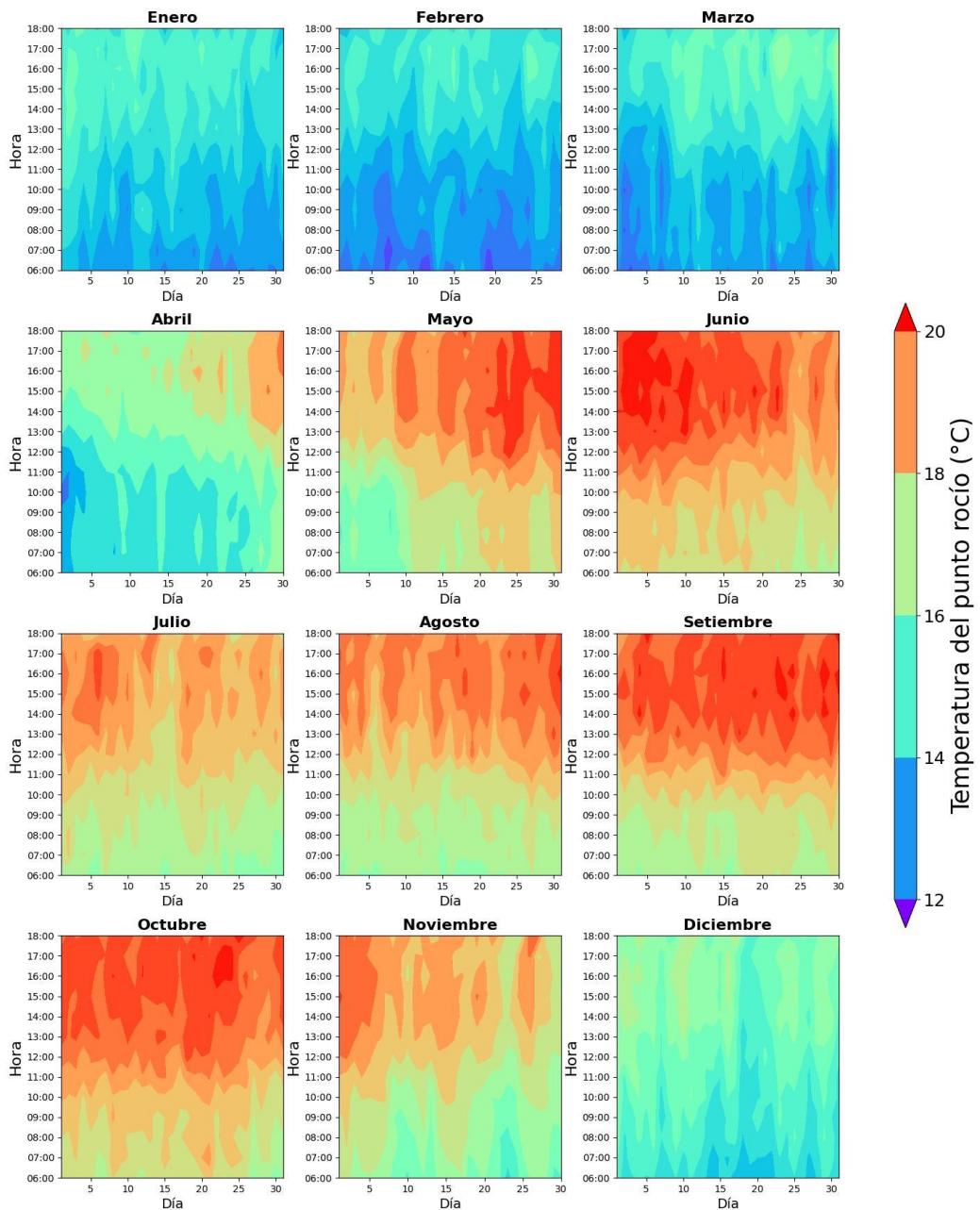


Figura 12. Distribución media diaria de la temperatura de rocío horaria para AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

e) Fenómenos de tiempo presente

Según la OMM (2018), tiempo meteorológico hace referencia a las observaciones del estado de la atmósfera y los fenómenos asociados, las cuales son descripciones cualitativas de los fenómenos observados en la atmósfera en la superficie de la Tierra. El tiempo presente es una descripción de los fenómenos meteorológicos que ocurren en el momento de la observación (OMM, 2018). Para efectos de esta climatología, estos se dividirán en hidrometeoros e hidrometeoros en suspensión.

Hidrometeoros

En la Figura 13 se muestra la cantidad de días con ocurrencia de hidrometeoros precipitantes en el AITBP. Estos fenómenos se refieren a cualquier forma precipitando en la atmósfera y, para efectos de este análisis, se clasifican en llovizna (DZ), lluvia (RA), chubascos de lluvia (SHRA) y tormentas, ya sea sin o con precipitación (TS o TSRA). El período de diciembre a marzo corresponde a la época seca de la región, con la menor cantidad de fenómenos de precipitación registrados. Durante estos meses, el número de días con tormentas es nulo, lo que podría estar asociado a una mínima convergencia en los niveles bajos de la atmósfera (Suárez y Rivera, 2014). Además, los eventos de llovizna y chubascos son escasos, lo que refuerza la caracterización de estos meses como la temporada seca del año.

En contraste, la temporada lluviosa se extiende de mayo a octubre, cuando se registra la mayor frecuencia de precipitaciones, coincidiendo con los meses que se registran mayores acumulados (figura 1). Durante estos meses, la lluvia es el fenómeno predominante, con más de 12 días de ocurrencia por mes, seguida por las tormentas y los chubascos, cuya frecuencia también aumenta significativamente.

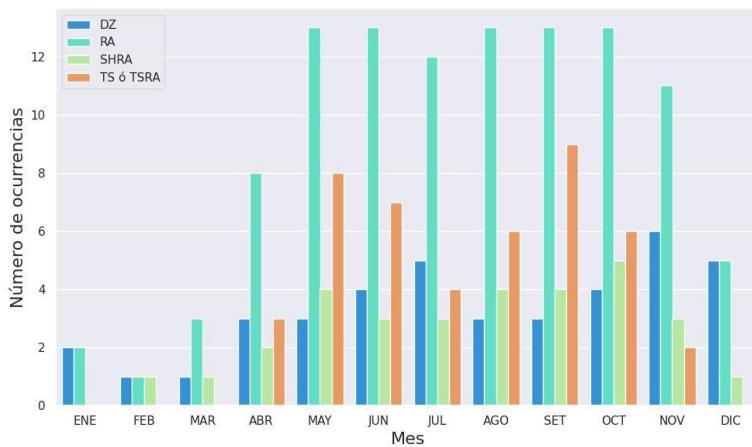


Figura 13. Valores mensuales medios de días con reportes de precipitación en el AITBP para el periodo 2005-2024. El color azul corresponde llovizna (DZ), el verde agua a lluvia (RA), el verde a chubascos de lluvia (SHRA) y el anaranjado a tormenta con o sin precipitación (TSRA o TS). Fuente: Elaboración propia.

f) Hidrometeoros en suspensión

Los hidrometeoros en suspensión hacen referencia a las partículas de agua que permanecen suspendidas en la atmósfera, reduciendo la visibilidad. Dentro de estos fenómenos destacan la niebla (FG) y la neblina (BR), los cuales se diferencian, según la OACI (2018), por el grado de reducción de la visibilidad: la niebla limita la visibilidad a menos de 1000 m, mientras que la neblina lo hace entre 1000 m y 5000 m.

En la figura 14 se muestra la cantidad de días con ocurrencia de estos fenómenos en un punto del Valle Central de Costa Rica. Durante la época seca (diciembre a marzo), la incidencia de niebla y neblina es mínima, lo que coincide con temperaturas del aire más altas y menores temperaturas de rocío (Figuras 9 y 11). Además, la presencia de vientos más fuertes y una menor humedad relativa dificultan su formación.

En contraste, la temporada lluviosa (mayo a octubre) presenta una mayor cantidad de registros, alcanzando su punto máximo en octubre, con cerca de 9 y 18 días de ocurrencia para la niebla o bancos de niebla y neblina, respectivamente. Durante este periodo, la humedad relativa elevada y la menor radiación solar favorecen la formación de estos hidrometeoros.

Cabe destacar que, a lo largo del año, la neblina es más frecuente que la niebla y bancos de niebla, manteniendo registros más altos en comparación con esta última. Sin embargo, ambas siguen una tendencia estacional similar, con mayor incidencia en los meses lluviosos.

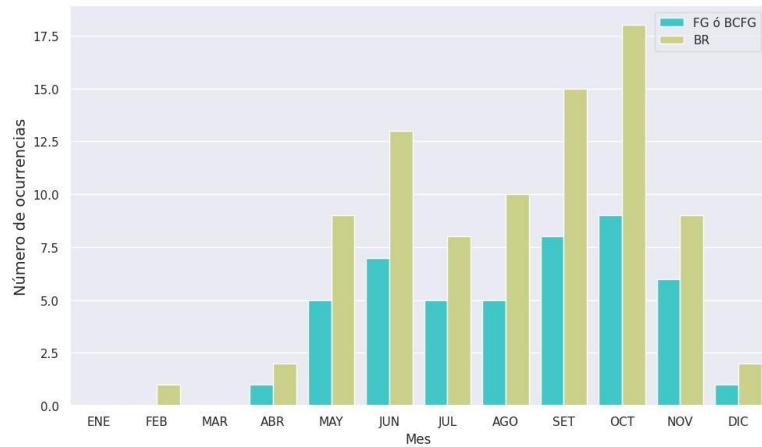


Figura 14. Valores mensuales medios de días con reportes de hidrometeoros en suspensión en el AITBP para el periodo 2005-2024. El color verde representa los casos de neblina (BR) y el verde-agua corresponde a niebla (FG). Fuente: Elaboración propia.

g) Visibilidad

En este estudio se analizó la distribución mensual y horaria de los días en los que la visibilidad horizontal reportada es inferior a 5000 m en un punto específico del Valle Central de Costa Rica. La visibilidad se define como la distancia a la que se puede identificar un objeto dentro de un círculo que cubre al menos la mitad del horizonte o de la superficie del aeródromo, de acuerdo con las pautas de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2018). La figura 15 ilustra que los meses de mayor reducción de visibilidad corresponden de manera prominente a los de mayo a noviembre, lo que coincide con la temporada lluviosa de la región (figura 1). Estos fenómenos están estrechamente relacionados con la presencia de hidrometeoros precipitantes y partículas en suspensión (como se observa en las figuras 13 y 14, respectivamente), los cuales contribuyen significativamente a la reducción de la visibilidad. El mes de julio presenta un mínimo relativo en la cantidad de días con visibilidad reducido, lo cual se

asocia con la canícula, periodo donde la precipitación y humedad disminuye (figuras 1, 13 y 14).

En cuanto a la distribución horaria, la figura 16 muestra que la visibilidad reducida se presenta principalmente entre las 13:00 y las 18:00 horas. Esto es consistente con los patrones típicos de convección y los efectos térmicos en el Valle Central durante la tarde, asociados a precipitaciones intensas y nieblas o neblinas. No obstante, también es relevante señalar que la reducción de visibilidad no se limita exclusivamente a estas horas, ya que las primeras tres horas de operación del aeropuerto (de 06:00 a 09:00 horas) también muestran reportes de visibilidad limitada, probablemente debido a la formación de niebla matutina, un fenómeno común en la región debido a la alta humedad y las bajas temperaturas nocturna.



Figura 15. Valores mensuales medios de días con reportes de visibilidad inferior a 5000 m y sus frecuencias de ocurrencia en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

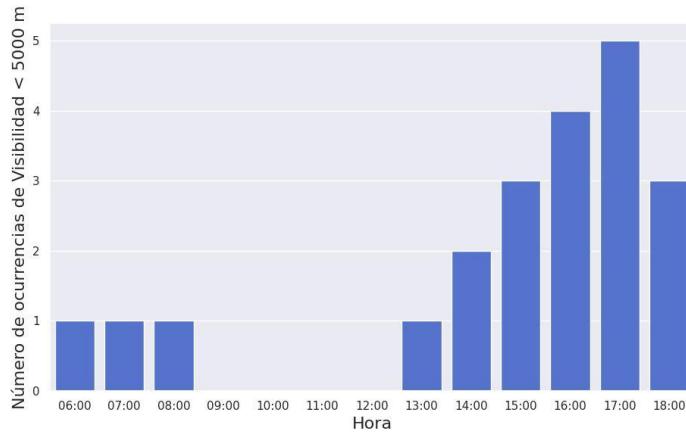


Figura 16. Valores mensuales medios de reportes visibilidad inferior a 5000 m durante el horario de operación en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

h) Nubosidad

En este estudio climatológico se analizó la altura a la que se presentan los techos de nubosidad, definidos como la capa de nubosidad más baja que cubre al menos 4 octas del cielo, considerando que el firmamento se divide en 8 secciones iguales. Según los informes METAR, esta altura se reporta en pies (ft) de acuerdo con la normativa de la OACI (2018). Dado que los techos de nubosidad inferiores a 1500 ft representan un riesgo para la aviación (según el Plan de Emergencias del Aeroportuarias AITBP), se analizaron los casos en los que se registró esta condición. Se identificó un comportamiento estacional, con el menor número de días con techos bajos durante la estación seca, en la que se registran menos de 2 días por mes con esta condición (Figura 17). Por el contrario, en la estación lluviosa, la frecuencia de techos bajos aumenta, alcanzando su máximo en octubre con 15 días registrados, lo que coincide con el mes de mayor precipitación y con el mayor número de días con fenómenos de tiempo presente (figuras 13 y 14). Además, se observa una disminución en julio, asociada con el periodo de canícula. Por otra parte, con respecto a su distribución horaria, la cantidad de reportes con techo de nubosidad inferior a los 1500 ft se presentan en su mayoría después de las 14:00 TL con más de 10 reportes por hora, periodo en donde la humedad en la estación es mayor (figura 18).

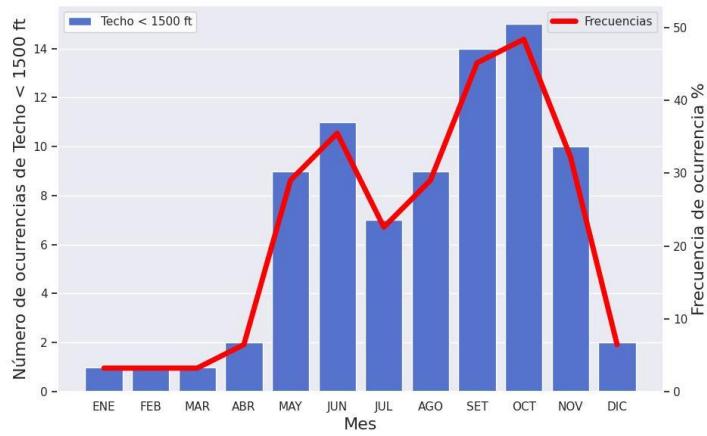


Figura 17. Valores mensuales medios de días con reportes de techo de nubosidad por debajo de los 1500 ft y sus frecuencias de ocurrencia en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

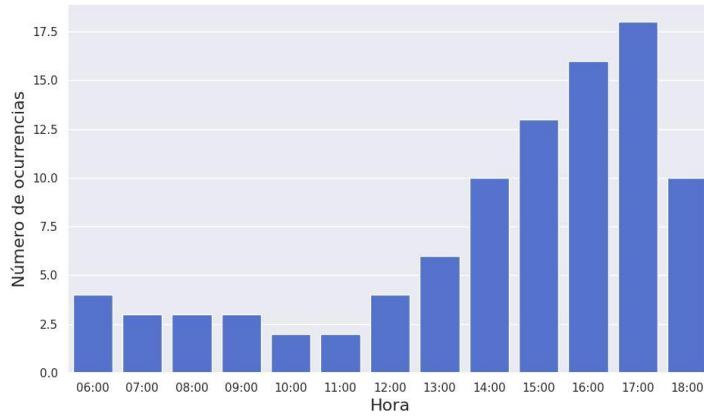


Figura 18. Valores mensuales medios de reportes de techo de nubosidad por debajo de los 1500 ft durante el horario de operación en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

i) CAVOK

Según la OACI (2018), se utilizará CAVOK cuando se presentan de forma simultánea las siguientes condiciones: la visibilidad horizontal sea mayor a 10 km, no se reporta nubosidad de importancia para las operaciones, es decir, a alturas mayores a 5000 ft, ni condiciones meteorológicas que tenga significación para la aviación. En la figura 19 se

muestra que la mayor cantidad de días con al menos 6 reportes con CAVOK corresponden al periodo de diciembre a abril, con más de 4 días por mes. Esto se asocia a los meses con condiciones más secas. Por otra parte, en los meses de junio a noviembre, correspondientes a la época lluviosa, esta condición se cumple en solo 1 día, lo cual se asocia a los meses con mayor cantidad de reportes de tiempo presente, techo de nubosidad por debajo de 1500 ft y visibilidad reducida. Con respecto a la distribución horaria, estos reportes se presentan en su mayoría durante la mañana, con su valor máximo de 14 reportes mensuales a las 07:00 TL (Figura 20).

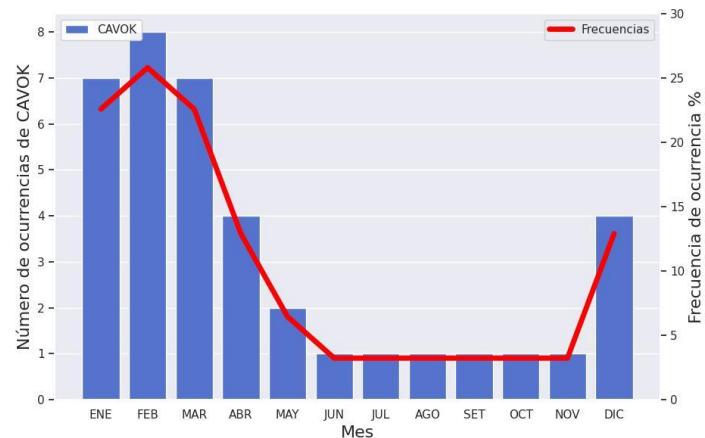


Figura 19. Valores mensuales medios de días con al menos seis reportes con CAVOK y sus frecuencias de ocurrencia en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

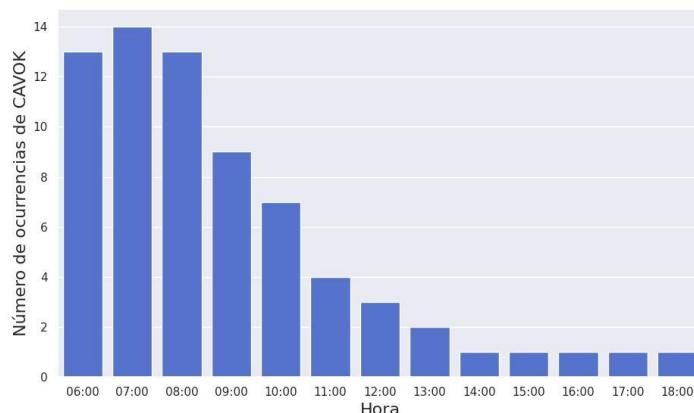


Figura 20. Valores mensuales medios de reportes con CAVOK durante el horario de operación en AITBP, 2005-2024. Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Por medio del análisis de las condiciones meteorológicas del Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma (AITBP), se lograron identificar los patrones estacionales bien definidos en estas condiciones, los cuales influyen directamente en las operaciones aeronáuticas.

En el Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma (AITBP) se observa un marcado comportamiento estacional en las condiciones meteorológicas. Durante la estación seca (diciembre-marzo), la precipitación acumulada representa menos del 3 % del total anual. Este período se caracteriza por valores elevados de presión atmosférica, asociados con la influencia de sistemas sinópticos que afectan la región. El incremento de la presión coincide con la intensificación de los vientos alisios del este, los cuales presentan velocidades moderadas a fuertes y una mayor frecuencia de ráfagas durante este período. Además, las condiciones son predominantemente secas, con puntos de rocío inferiores a 15 °C, una menor ocurrencia de techos nubosos por debajo de 1 500 pies y un incremento en la cantidad de días con más de cinco reportes de CAVOK. La incidencia de fenómenos de tiempo presente es aislada durante este período.

En contraste, la estación lluviosa (mayo-octubre) se caracteriza por acumulados mensuales de precipitación superiores a 200 mm, con excepción de julio, cuando ocurre la canícula. Este fenómeno se distingue por una reducción temporal de la precipitación, un aumento en la presión atmosférica y vientos más intensos. Durante la estación lluviosa, el viento predominante en el aeródromo proviene del sur y suroeste durante las horas de operación, salvo en las primeras horas de la mañana, cuando la dirección promedio del viento cambia al este y sureste. En este período, las condiciones son más húmedas y nubladas, favoreciendo la ocurrencia de hidrometeoros e hidrometeoros en suspensión, lo que contribuye a una reducción de la visibilidad tanto vertical como horizontal en el aeródromo. La lluvia es el fenómeno que se presenta con más frecuencia durante estos meses.

Los meses de abril y noviembre corresponden a períodos de transición entre ambas estaciones, durante los cuales se observan variaciones progresivas en los patrones de viento y temperatura, tanto del aire como del punto de rocío. A lo largo de estos meses,

la dinámica atmosférica evoluciona gradualmente, reflejando el cambio estacional en el aeródromo. Sin embargo, abril es el mes con las temperaturas promedio más altas, mientras que noviembre registra valores más bajos, con una diferencia aproximada de 1.75 °C entre ambos meses.

Estos resultados proporcionan información valiosa para la gestión y planificación de las operaciones aeroportuarias. La identificación de los patrones de viento, visibilidad y precipitación permite anticipar condiciones meteorológicas adversas, optimizar la programación de vuelos y mejorar la seguridad operacional.

5. REFERENCIAS

- Alfaro Martínez, E. J., Alvarado Gamboa, L. F., Fallas López, B. G., Mora Sandí, N. P., & Hidalgo, H. G. (2024). Caracterización climática y análisis de mecanismos moduladores del descenso de las lluvias en la vertiente Caribe de América Central durante septiembre-octubre. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(1).
- Amador, J. A. (2008). The intra-Americas sea low-level jet: Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 153-188.
- Betts, A. K., & Ball, J. H. (1995). The FIFE surface diurnal cycle climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D12), 25679-25693.
- Carballo Arce, M. M. (2023). Proyecto de Ley para potenciar la infraestructura y seguridad de los aeropuertos internacionales y aeródromos estatales de Costa Rica (Expediente N.º 23.422). *Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica*.
- Castillo, R. y Amador, J.A. (2020). Precipitation and Temperature in Costa Rica at the End of the Century Based on NEX-GDDP Projected Scenarios. *Atmosphere*, 11(12), 1323. doi.org/10.3390/atmos11121323
- Chinchilla, G., Gutiérrez, J., & Zárate, E. (2016). Eventos extremos de lluvia ocasionados por empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal (NDEF) del

año 2000 al 2010: Líneas de cortante. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15(2), 48-62.

Dai, A., & Wang, J. (1999). Diurnal and semidiurnal tides in global surface pressure fields. *Journal of the atmospheric sciences*, 56(22), 3874-3891.

Dirección General de Aviación Civil (2022). Plan de Emergencias Aeroportuarias AITBP. Recuperado de: sub.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2022/11/7M21-Plan-de-Emergencias-Aeroportuarias-AITBP-R.03.pdf

Dirección General de Aviación Civil (2023). Anuario Estadístico de Transporte Aéreo 2022. Recuperado de: www.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2023/11/Anuario-2022-1.pdf

Durán-Quesada, A.M., Sorí, R., Ordoñez, P. y Gimeno, L. (2020). Climate Perspectives in the Intra-Americas. *Atmosphere*, 11(9), 959. doi.org/10.3390/atmos11090959

Escrí Barbera, J., Montón Chiva, E., & Quereda Sala, J. (2013). Climatología aeronáutica del aeropuerto de Castellón (Vol. 9). *Publicacions de la Universitat Jaume I*.

Flores-Rosales, S. (2023). Agroclimatología de la Región Central de Costa Rica [Tesis de Magister en Meteorología Agrícola]. *Universidad de Buenos Aires*.

Instituto Meteorológico Nacional (2008). Segunda Comunicación sobre Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Documento Técnico. MINAET, IMN, PNUD, CRRH. San José, Costa Rica, pp 20-23. Recuperado de: www.cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/el-clima-su-variabilidad-y-cambio-climatico-en-costa-rica/

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2011). Plan Nacional de Transporte 2011-2035. Recuperado de: www.mopt.go.cr/sites/default/files/destacados/planificacion-sectorial/documentacion/planes/pnt/memoria-pnt.pdf

Mora, N., Amador, J. A., Rivera, E. R., & Maldonado, T. (2020). A Sea Breeze Study during Ticosonde-NOME 2004 in the Central Pacific of Costa Rica: observations and numerical modeling. *Atmosphere*, 11(12), 1333. doi.org/10.3390/atmos11121333

Organización de Aviación Civil Internacional. (2009). AERMETSG/10 – IP/05: Climatology to build a better TAF [Documento de trabajo]. www.icao.int/SAM/Documents/GREPECAS/2009/AERMET10/Aermetsg10-IP05.pdf#search=climatology

Organización de Aviación Civil Internacional. (2018). Anexo 3: Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea Internacional. (Anexo3, 20ed). Montreal, Canadá.

Organización Meteorológica Mundial (2018). Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación (OMM-N°8). Ginebra, Suiza.

Reglamento de Servicio meteorológico para la navegación aérea. Decreto Ejecutivo N.º 42678. 19 de noviembre 2020.

Solano León, E. H. (2015). Análisis del comportamiento de los períodos caniculares en Costa Rica en algunas cuencas del Pacífico Norte y Valle Central entre los años 1981 y 2010. [Tesis de Licenciatura en Meteorología]. *Universidad de Costa Rica*.

Suárez Arce, T., & Rivera Fernández, E. (2021). Modelado numérico en el Valle Central Occidental de Costa Rica durante el invierno boreal: sensibilidad al esquema de capa límite. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 20(1), 29-49.