



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Ciencias de la Atmósfera

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

**“Análisis del Índice de Confort Térmico
Universal UTCI en tres ciudades argentinas”**

Tesista:

Esteban Andrés Zúccaro

Directora:

Mariana Barrucand

Asistente de tesis:

Agustina Lopez Ramirez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Buenos Aires y en especial a los profesores, JTPs y ayudantes del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos por haberme brindado una educación pública de excelencia.

A mi familia por estar siempre apoyándome en todo lo que me propuse

A mis amigos por estar siempre alentando en mi progreso y preguntando cuando llueve sobretodo cuando hay asado

A mis directoras de tesis: Mariana y Agustina por asistirme en este camino tanto en la parte técnica como personal, dándome el apoyo y el ánimo necesario para hacer el mejor trabajo posible

A mis compañeros y compañeras de facultad, de los cuales varios son amigos, por tantas juntadas de estudio, apoyo y amistad durante toda la carrera

Al Servicio Meteorológico Nacional por proveerme la información necesaria para la realización de esta tesis

A mis compañeros y jefes del Servicio Meteorológico Nacional por su asistencia y ayuda en este trabajo y mi carrera profesional

RESUMEN

El UTCI es un índice de confort térmico que resume el efecto de la temperatura ambiental, la velocidad del viento, la humedad, y los flujos radiativos de onda larga y onda corta sobre el cuerpo humano. Fue desarrollado a modo de indicador universal, lo cual lo convierte en una herramienta versátil para distintos tipos de clima, aplicaciones bio-meteorológicas e incluso estudios epidemiológicos.

En esta tesis se calculó y analizó el índice de estrés térmico UTCI de los meses de verano (diciembre-enero-febrero) en las tres ciudades de mayor población de Argentina: Buenos Aires, Córdoba y Rosario, considerándose 5 horas del día (6, 9, 12, 15 y 18 hora local) durante un periodo de 40 años (1981-2020).

Se realizó una caracterización estadística del índice y se analizó su variabilidad decadal e interanual, prestando especial atención a las condiciones de estrés severo. Finalmente se analizó un caso de estudio correspondiente a un periodo excesivamente cálido ocurrido en el verano de 2023.

En la última década, aproximadamente el 50% de los días de verano registraron condiciones de estrés severo a las 15 hs en las tres ciudades analizadas, porcentaje que fue aún mayor en Rosario y en Buenos Aires. El análisis de variabilidad temporal mostró un aumento significativo del índice UTCI en todas las horas analizadas en estas dos ciudades, mientras que Córdoba registró una disminución del índice en la hora 6 y no registró cambios en el resto de las horas.

Al analizar los cambios en la ocurrencia de frecuencia de condiciones severas, la ciudad de Buenos Aires es la que registró los cambios más significativos, con un aumento de estas condiciones en todas las horas estudiadas (excluyendo la hora 6, sin condiciones severas en el período). En

términos generales, se observó una mayor frecuencia de viento con componente norte y menor frecuencia de componente sur en los casos de estrés severo. Más aún, se encontró que la frecuencia de componente sur en la ciudad de Buenos Aires disminuyó en el período estudiado, en consonancia con el aumento del índice UTCI.

El estudio de caso presentado en esta tesis describe un período anormalmente cálido del verano del 2023 que estuvo caracterizado por una situación de bloqueo que impidió el ingreso de aire más frío y seco a la ciudad de Buenos Aires. Los valores de UTCI resultaron muy elevados durante estos días, registrándose condiciones severas y muy severas en horas de la tarde e incluso condiciones de estrés moderado a las 6 AM en 3 días del período, algo completamente inusual. La intensidad del viento fue el principal factor que moduló las diferencias entre la temperatura del aire y el UTCI, en concordancia con resultados encontrados en otros estudios.

Índice

1. Introducción	4
1.1 Interés del estudio	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Objetivos e hipótesis del trabajo	8
1.4 Estructura de la tesis	9
2. Datos y metodología	11
2.1 Ciudades de estudio, periodo analizado y datos utilizados	11
2.2 El Índice UTCI y su cálculo	12
2.3 Análisis estadístico	14
2.3.1 Variación decadal e interanual del índice de estrés térmico UTCI	14
2.3.2 Evaluación de las condiciones de estrés térmico severo	16
2.3.3 Caso de estudio: evolución diaria del índice UTCI durante un período extenso anormalmente cálido durante el verano de 2023	17
3. Análisis climatológico de las variables que conforman el índice UTCI	19
4. Climatología y variabilidad temporal del índice de estrés térmico UTCI	21
4.1 Climatología del índice UTCI y variabilidad decadal	21
4.2 Anomalía anual del índice UTCI	24
4.3 Análisis de la diferencia entre UTCI y la temperatura del aire	27
5. Evaluación de las situaciones de estrés térmico severo o muy severo	32
5.1 Variabilidad interanual del índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$	32
5.2 Patrones del viento en situaciones estrés térmico severo	36
5.2.1 Análisis de la frecuencia absoluta de la componente sur del viento durante los veranos del período 1981-2020	40
5.3 Análisis de dos olas de calor y un período récord excesivamente cálido durante el verano 2023	44
5.3.1 Patrones sinópticos y circulación del viento asociada	44
5.3.2 Variación diaria del índice de estrés térmico UTCI	48
5.3.3 Comparación entre la diferencia UTCI-Temperatura y las variables meteorológicas	
50	
6. Conclusión	55
Bibliografía	59

Índice de figuras

Figura 2.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas elegidas, Cordoba Aero y Rosario Aero, Observatorio Buenos Aires.....	página 11
Figura 4.1 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Córdoba.....	página 22
Figura 4.2 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Buenos Aires.....	página 23
Figura 4.3 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Rosario.....	página 24
Figura 4.4 Anomalía anual del índice UTCI para la ciudad de Córdoba a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 25
Figura 4.5 Anomalía anual del índice UTCI para la ciudad de Buenos Aires a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 26
Figura 4.6 Anomalía anual del índice UTCI para la ciudad de Rosario a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 27
Figura 4.7 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Córdoba en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 29
Figura 4.8 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Buenos Aires en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 30
Figura 4.9 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Rosario en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 31
Figura 5.1 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Córdoba.....	página 33
Figura 5.2 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Buenos Aires	página 34
Figura 5.3 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Rosario.....	página 35
Figura 5.4 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (barras) vs climatología (puntos) para la ciudad de Córdoba.....	página 37
Figura 5.5 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (barras) vs climatología (puntos) para la ciudad de Buenos Aires.....	página 38
Figura 5.6 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (barras) vs climatología (puntos) para la ciudad de Rosario.....	página 39

Figura 5.7 Serie temporal de frecuencia absoluta componente sur para la ciudad de Córdoba en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 41
Figura 5.8 Serie temporal de frecuencia absoluta componente sur para la ciudad de Buenos Aires en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 42
Figura 5.9 Serie temporal de frecuencia absoluta componente sur para la ciudad de Rosario en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.....	página 43
Figura 5.10 Mapas de 500 hPa a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (<i>Fuente Real-Time GFS Maps, Alicia M. Bentley, Albany University</i>).....	página 45
Figura 5.11 Mapas de 850 hPa a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (<i>Fuente Real-Time GFS Maps, Alicia M. Bentley, Albany University</i>).....	página 46
Figura 5.12 Cartas de superficie a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (<i>Fuente Real-Time GFS Maps, Alicia M. Bentley, Albany University</i>).....	página 47
Figura 5.13 Histograma comparativo entre el periodo 2023 (puntos) y la climatología (barras) para las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local en la ciudad de Buenos Aires.....	página 48
Figura 5.14 Índice UTCI para las horas 06, 09, 12, 15 y 18 hora local del periodo 28/02/2023 al 14/03/2023, en la ciudad de Buenos Aires.....	página 49
Figura 5.15 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 6h.....	página 51
Figura 5.16 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 9h.....	página 52
Figura 5.17 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 12h.....	página 53
Figura 5.18 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 15h	página 54
Figura 5.19 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 18h	página 55

1. Introducción

1.1 Interés del estudio

Las características del entorno, tales como la temperatura del aire, la humedad, el viento y los flujos radiativos, desafían día a día la habilidad del cuerpo humano para mantener su temperatura dentro del rango óptimo para su confort y bienestar (McGregor y Vanos, 2018). Usualmente, los episodios con temperaturas extremas generan impactos significativos en la salud de las personas y presentan un desafío tanto para la salud pública como para los servicios de protección civil (Kovats y Hajat, 2008). El agotamiento, los golpes de calor e incluso la mortalidad se encuentran asociados directamente con la exposición a altas temperaturas y dependen no solo de la naturaleza misma del evento sino que también de la locación y susceptibilidad de las poblaciones afectadas (Ebi et al., 2021).

En la actualidad, existen diversos índices que permiten evaluar el confort térmico de las personas teniendo en cuenta no solo parámetros meteorológicos sino también aspectos fisiológicos del cuerpo humano. Entre ellos se puede mencionar el “Universal Thermal Climate Index” (UTCI), un índice que resume el efecto de la temperatura ambiental, la velocidad del viento, la humedad, y los flujos radiativos de onda larga y onda corta sobre el cuerpo humano. Una particularidad de este índice es que fue desarrollado a modo de indicador universal, lo cual lo convierte en una herramienta versátil para distintos tipos de clima, aplicaciones bio-meteorológicas e incluso estudios epidemiológicos (Jendritzki et al., 2012).

Si bien los índices permiten realizar una exploración integral de los fenómenos meteorológicos asociados a situaciones de estrés térmico sobre las personas, aún son pocos los estudios que los incluyen. Di Napoli et al. (2018) estudió, en un periodo de 38 años, la variabilidad espacio-temporal del índice UTCI en Europa y su relación con las muertes registradas por cualquier causa. En este estudio, donde solo se analizaron los veranos y horas diurnas, concluyó que existe un aumento del índice durante las últimas décadas analizadas en algunas ciudades de la región y que en ellas las muertes tienen

correlación con el nivel de estrés moderado y fuerte. En Sudamérica se encontró un claro contraste de situaciones de estrés térmico entre diferentes topografías y latitudes con puntos críticos en Amazonia y norte y centro de la región (Miranda et al. 2024). Similarmente, Huang et al. (2021) realizó un análisis espacio-temporal del índice UTCI en el Ártico y durante el periodo 1979-2019 en donde mostró un aumento del nivel de estrés térmico y concluyó la presencia de mejores condiciones de confort térmico para el desarrollo del turismo en la zona. Otros trabajos sugieren que el índice UTCI puede ser una herramienta adecuada para el planeamiento del confort térmico urbano en regiones subtropicales (Bröde et al., 2011).

El aumento de frecuencia de olas de calor establece una demanda y amenaza a la salud pública, por lo que estudios de estrés térmico que utilizan índices como el UTCI resultan de especial interés. Todo lo anterior pone de manifiesto el potencial y la versatilidad del índice UTCI para el estudio de los impactos del clima en la salud y sostiene la necesidad de una mejor comprensión de índices que integran distintas variables meteorológicas, como el UTCI, dentro de un clima cambiante.

1.2 Antecedentes

Existen distintos tipos de índices de estrés térmico, con distinto grado de complejidad de cálculo. En algunos casos tienen en cuenta 2 variables y, en otros, 3 o más. Por ejemplo, el Wind Chill y el Heat Index utilizan dos variables para describir el nivel de confort térmico en humanos. El primero tiene en cuenta la temperatura ambiente y el viento y el segundo la temperatura y humedad. Para el cálculo del UTCI o índice universal de confort térmico, se utilizan 4 variables: temperatura ambiente, intensidad del viento, humedad relativa y nubosidad.

Varios estudios sobre índices de estrés térmico han buscado determinar el que mejor se adapte a las condiciones meteorológicas reinantes en la región estudiada, analizándose en particular la sensibilidad del índice ante cambios en las variables utilizadas. Varios de estos trabajos incluyen el análisis de los cambios a lo largo del tiempo, en distintas regiones del mundo.

En Nigeria se han estudiado 3 índices de confort térmico aplicados a diferentes estaciones meteorológicas, junto con una caracterización del clima de la región en el periodo 1951-2009 (Eludoyin et al., 2013). En este estudio se consideró la temperatura efectiva (**ET**), el índice de temperatura-humedad (**THI**) y el índice de tensión relativa (**RSI**), cuyos cálculos incluyen las variables de temperatura y humedad, y se concluyó que, a pesar que el nivel de estrés térmico ha aumentado en el periodo estudiado en la mayoría de las estaciones analizadas, se necesita del uso de diferentes índices para caracterizar el confort térmico de la región.

Frohlich et al. (2015) analizó la temperatura percibida (**PT**), el índice universal de estrés térmico (**UTCI**) y la temperatura fisiológica equivalente (**PET**) en Doha, Qatar, una ciudad de clima cálido y seco, entre los años 1999 y 2014. Este estudio se basó en comparar los índices entre sí analizando la sensibilidad de estos con distintas variables. Los tres índices utilizan, como condición inicial en el cálculo, un ambiente de referencia que, luego de incorporar las variables meteorológicas observadas, reproduce la temperatura percibida por el cuerpo humano en el ambiente real. Los tres índices presentaron sensibilidad alta ante cambios en la temperatura del aire mientras que para la intensidad del viento el índice **UTCI** fue el de mayor cambio en sus valores ante variaciones de esta variable. También se indica que, a partir de un umbral de temperatura del aire, el aumento del viento comienza a generar mayor percepción térmica y no menor como se espera en temperaturas más bajas. Los autores concluyen que tanto **UTCI** como **PET** representan de manera más fiable la percepción térmica humana en condiciones de calor y viento. Krzysztof Blazejczyk et al. (2011) también realizaron una comparación entre el índice **UTCI** y otros comúnmente usados, tales como el Heat Index, el Humidex, ET y el WBGT. El **HI o Heat Index** combina la temperatura y humedad para determinar la temperatura percibida por el humano. Este es válido para temperaturas ambiente por encima de los 20°C y sus valores se categorizan según posibles trastornos de salud en las personas. En cuanto al **Humidex** combina la temperatura ambiente y la presión de vapor en hPa para también proporcionar la temperatura percibida por el ser humano. El índice **ET** (temperatura efectiva) utiliza la temperatura ambiente, la humedad relativa y velocidad del viento, mientras que el **WBGT** (Wet bulb and global temperature) tiene en cuenta la

temperatura de globo negro, temperatura de bulbo húmedo y temperatura del aire aunque, en su versión simplificada, se calcula solo con la temperatura del aire y la presión de vapor. En este estudio se encontraron resultados muy interesantes para el desarrollo de esta tesis. En primer lugar llegaron a la conclusión de que el índice UTCI se adapta a cualquier tipo de clima, región y situación meteorológica mientras que el resto de los índices analizados expresan razonablemente el estrés térmico en situaciones meteorológicas específicas.

El **Wind Chill Index (WC)** combina la temperatura ambiente y la velocidad del viento para representar el nivel de confort humano en un entorno de bajas temperaturas al aire libre. Considera que con mayor intensidad del viento el cuerpo humano sentirá “mayor frío” y por lo tanto disminuirá el nivel de confort. Mesut Doğan (2020) aplicó este índice en la zona central de Anatolia, Turquía, para determinar la época y las zonas con más riesgo para la salud y llegó a la conclusión de que en invierno (de diciembre a febrero) se daban las situaciones de mayor riesgo (bajo a moderado) en la zona este de la región estudiada.

El **Thermal Work Limit (TWL)** es un índice que utiliza las variables temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, intensidad del viento y presión atmosférica para reproducir el nivel de confort en ambientes térmicamente estresantes como ser industrias de construcción o agricultura. Miller y Bates (2007) estudiaron este índice con un grupo de trabajadores en un ambiente controlado y uno al aire libre y llegaron a la conclusión que, en ambos casos, el índice **TWL** predecía de manera más confiable el estrés térmico en comparación con el **WBGT**.

Otro índice de confort que puede encontrarse en la literatura y es comúnmente usado en entornos urbanos es el **TDI** (Thom's Discomfort Index). Este índice combina la temperatura ambiente y la humedad relativa para dar como resultado el malestar fisiológico percibido por el cuerpo humano. Monforte y Ragusa (2022) aplicaron este índice en el periodo cálido (mayo-septiembre 2000-2021) de las provincias de Sicilia, Italia en donde realizaron la primera caracterización bioclimática de la zona y encontraron tendencias crecientes significativas del índice en especial durante los meses agosto y septiembre.

En Sudamérica, el estudio de la relación entre el bienestar de las personas y la variabilidad climática aún es limitado. Kephart et al. (2022) exploraron la asociación entre la temperatura y la mortalidad en 326 ciudades latinoamericanas y demostraron que las temperaturas extremas, sean cálidas o frías, contribuyen a aproximadamente el 5,76% de las defunciones consideradas para el estudio. Recientemente, Miranda et al. (2024) realizaron un estudio de bioclimatología en un periodo de 40 años considerando el índice UTCI de la base ERA5 Heat (Di Napoli et al. 2020) para toda la región Sudamericana. En este estudio se evidenció un aumento significativo de la cantidad de horas por año bajo condiciones de estrés térmico por calor durante los últimos 20 años analizados como también mayor cantidad de horas consecutivas bajo situaciones de estrés térmico con respecto a los primeros 20 años. En Argentina, Almeira et al. (2016) realizaron un estudio sobre los efectos de las temperaturas diarias en la Ciudad de Buenos Aires y Rosario en los años 2001-2012 y 2001-2011 respectivamente. En ambas localidades, la población resultó ser susceptible a la ocurrencia de períodos con altas temperaturas. Los más afectados fueron los adultos de 65 años o más, sugiriendo que los mayores son particularmente vulnerables a temperaturas extremas cálidas. Posteriormente, Natalia Herrera, desarrolló en 2018 un sistema de alerta temprana por olas de calor en función a estadísticas de mortalidad con el fin de anticipar a la población sobre el riesgo de las altas temperaturas según el rango etario (Servicio Meteorológico Nacional. **Nota técnica 2018-50**). Otros trabajos exploraron los efectos del clima sobre la salud a partir de estudios de caso. Entre ellos se puede mencionar Campetella y Rusticucci (1998), quienes analizaron la temperatura efectiva (**EFT**) y el índice de estrés térmico relativo (**TRI**), dos índices bio meteorológicos que se basan en temperatura y la humedad, durante una ola de calor severa en la Ciudad de Buenos Aires. Los autores concluyeron que la combinación de calor extremo y alta humedad generó niveles peligrosos de estrés térmico para las personas durante la ola de calor. Todo esto revela el vínculo entre la salud y el ambiente y sustenta la necesidad de una mejor comprensión de las condiciones climáticas que afectan a las personas, utilizando tanto la temperatura como otras variables meteorológicas e índices representativos del confort térmico para su análisis.

1.3 Objetivos e hipótesis del trabajo

El estrés por calor influye negativamente en la salud de los seres humanos y conduce a una menor eficiencia en las actividades diarias. El nivel de estrés puede ser cuantificado a través de índices de confort térmico, que tienen en cuenta no solamente la temperatura, sino también otras variables meteorológicas tales como la humedad, la intensidad del viento y/o la radiación. El índice UTCI es un índice que involucra en su cálculo todas las variables antes mencionadas, así como también aspectos inherentes al cuerpo humano (metabolismo, intercambio de calor por evaporación, convección de calor) y las reacciones a las condiciones ambientales (escalofríos, sudoración o vasodilatación), por lo que resulta de interés su caracterización y estudio. Este interés ha quedado reflejado en la generación de la base de datos ERA5-Heat, que representa el estado del arte actual para la producción de registros de datos de bioclimatología.

El objetivo general de la tesis es analizar la variabilidad del índice de confort térmico humano UTCI durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) en las 3 ciudades con mayor población en Argentina: Buenos Aires, Córdoba y Rosario en el período 1981-2020, prestando especial atención a los casos de mayor estrés térmico.

A fin de cumplimentar este objetivo general, se presentan los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar las condiciones de temperatura, humedad, viento y nubosidad de las ciudades bajo estudio en distintas horas del día (6, 9, 12, 15 y 18 hora local) durante los meses de verano del período 1981-2020
2. Calcular el índice de confort térmico UTCI de las ciudades en las horas del día antes mencionadas y analizar su variabilidad temporal
3. Explorar la ocurrencia y variabilidad de las condiciones de mayor estrés térmico determinadas por el índice
4. Analizar el índice UTCI durante un período con altas temperaturas persistentes del verano (2023) y caracterizar las condiciones atmosféricas asociadas a los días/horas de mayor estrés térmico

1.4 Estructura de la tesis

Este trabajo final se divide en 6 capítulos de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Se plantea motivación, objetivos de trabajo y antecedentes de estudios sobre el índice UTCI y otros índices de estrés térmico.
- Capítulo 2: Se detallan datos y metodología utilizadas en la tesis
- Capítulo 3: Se realiza un análisis climatológico de las variables utilizadas para el cálculo del índice, en cada estación meteorológica correspondiente a las ciudades estudiadas.
- Capítulo 4: Se identifican las categorías de confort térmico más frecuentes en las distintas ciudades y horas estudiadas, así como su variabilidad temporal.
- Capítulo 5: Se analiza la frecuencia de días con fuerte estrés por calor ($UTCI > 32^\circ\text{C}$) y se evalúa su tendencia y saltos de las series temporales en las tres estaciones meteorológicas. En particular se analiza las condiciones atmosféricas asociadas a los días con mayor estrés térmico durante el periodo récord de temperaturas excesivamente altas durante el verano 2023 (estudio de caso).
- Capítulo 6: Finalmente se discuten resultados y se presenta la conclusión del trabajo.

2. Datos y metodología

2.1 Ciudades de estudio, periodo analizado y datos utilizados

Las ciudades seleccionadas para este estudio fueron Rosario, Córdoba y Ciudad de Buenos Aires debido a que son las ciudades más pobladas de la República Argentina y, por lo tanto, las situaciones de estrés térmico pueden generar impactos considerables en la salud y en un importante número de personas. Las variables meteorológicas consideradas para el cálculo del índice UTCI fueron obtenidas de estaciones meteorológicas convencionales pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional: Córdoba Aero (31.29663°S, 64.21185°W, 493 m), Observatorio Ciudad de Buenos Aires (34.590015°S, 58.48388°W, 25 m) y Rosario Aero (32.90816°S, 60.78216°W, 25 m). En la **figura 2.1** se muestra la ubicación de dichas localidades.

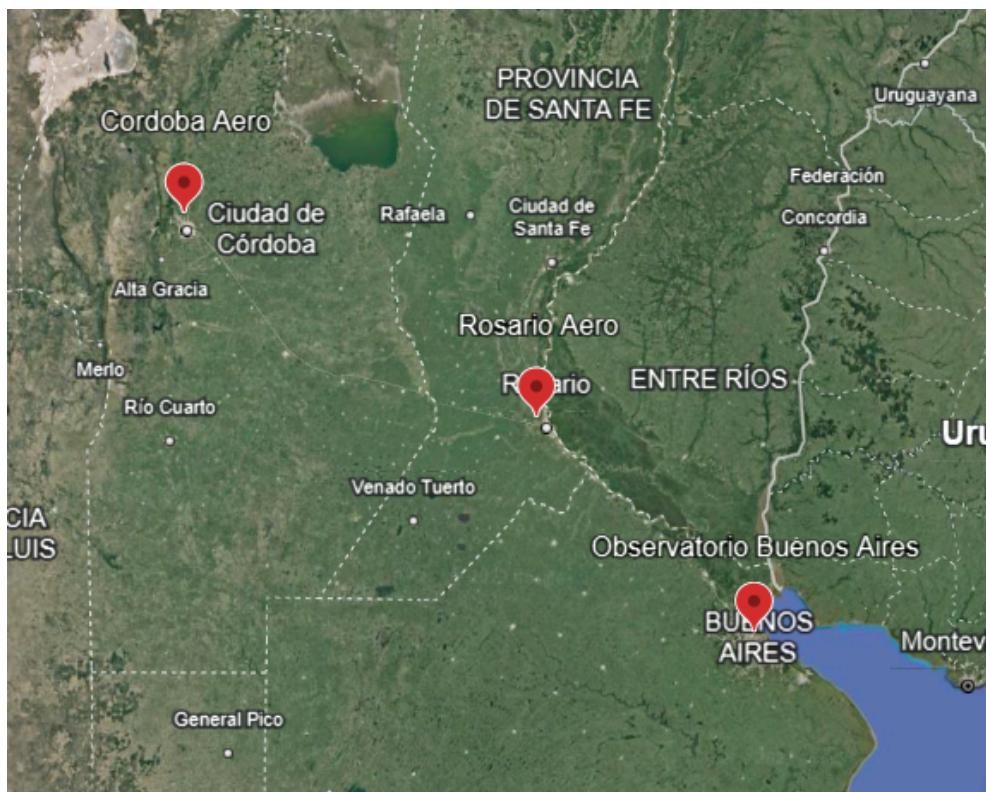


Figura 2.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas elegidas, Cordoba Aero y Rosario Aero, Observatorio Buenos Aires.

Con el objetivo de analizar las condiciones de estrés por altas temperaturas, el estudio se focalizó en los meses de verano (diciembre, enero y febrero), desde el verano de 1981 hasta el verano del 2020. Las variables meteorológicas analizadas fueron: temperatura a 2 metros [°C], humedad relativa [%], intensidad del viento [km/h] y nubosidad [octas], todas ellas requeridas para el cálculo del índice UTCI. Además, se seleccionaron las horas 06, 09, 12, 15 y 18 hora local debido al interés de analizar el ciclo diurno. Los datos fueron provistos por el Centro de Información Meteorológica perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional.

Teniendo en cuenta el periodo y horas seleccionadas, no se encontraron datos faltantes en ninguna de las tres estaciones meteorológicas.

2.2 El Índice UTCI y su cálculo

El índice UTCI representa la temperatura aparente que percibe el ser humano al estar expuesto a determinadas condiciones de temperatura, humedad relativa, flujos de onda corta y onda larga e intensidad del viento, y se expresa en unidades de grados centígrados [°C]. El UTCI se basa en el modelo multinodo de Fiala (Fiala et al. 2011) y adaptado con un modelo de ropa (Havenith et al. 2011) los cuales simulan la interacción del cuerpo humano con la condición meteorológica existente, dando como resultado la temperatura percibida por el cuerpo ante esos parámetros. En la **Figura 2.2** se esquematiza el procedimiento para la obtención de la respuesta fisiológica del cuerpo humano según las 4 variables meteorológicas utilizadas.

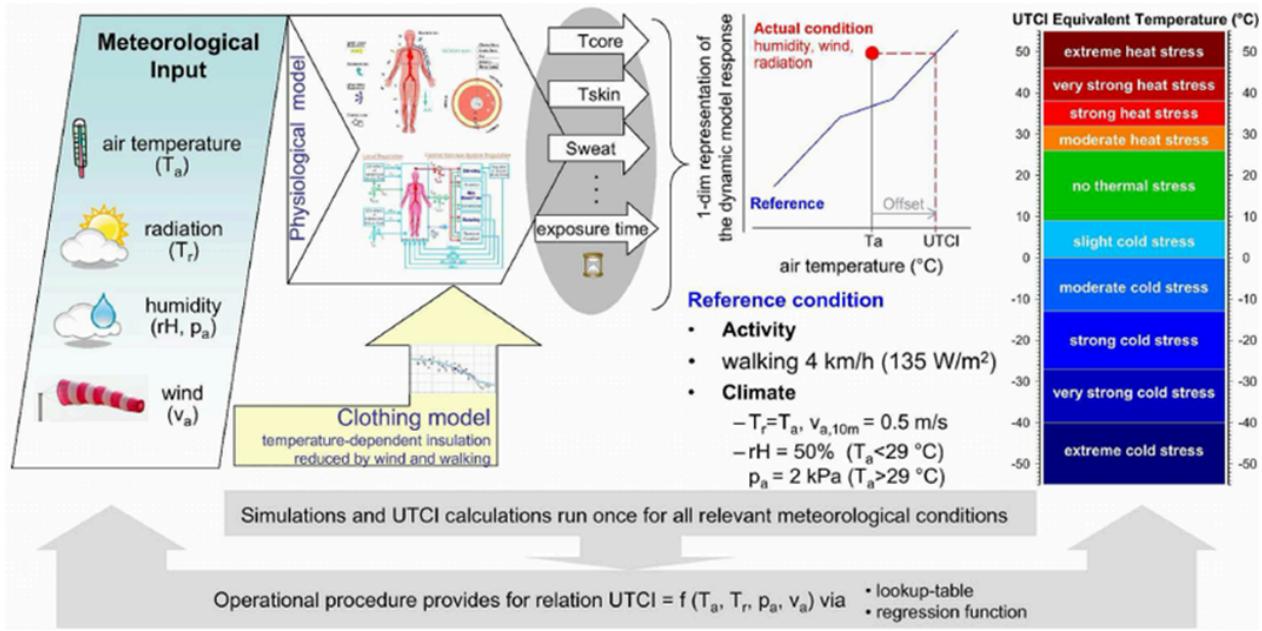


Figura 2.2 Esquema para el cálculo del índice UTCI según las variables de entrada y el modelo fisiológico y de vestimenta utilizados (Bröede et. al 2013a,b)

Las condiciones de referencia que utiliza el modelo tienen en cuenta una velocidad del viento igual a 0.5 m/s (medidos a 10 metros), una temperatura media radiante igual a la temperatura del aire, humedad relativa del 50% (si la temperatura del aire es menor o igual a 29°C) o presión de vapor de 20 hPa (si la temperatura del aire es mayor a 29°C) y considerando a una persona que camina a una velocidad de 4 m/s. Este índice sigue el concepto de temperatura equivalente, y se define como la temperatura del aire bajo las condiciones de referencia que produciría la misma tensión térmica que el entorno real. El UTCI es un índice derivado de un modelo complejo que, a partir de las variables meteorológicas mencionadas, permite estimar el nivel de confort humano en cualquier clima y lugar. En la **tabla 2.1** se detallan los umbrales que definen el tipo de estrés térmico que podría percibir un ser humano expuesto a las condiciones meteorológicas según el valor del índice UTCI (Huang et al., 2021).

Tabla 2.1 Temperaturas equivalentes UTCI categorizadas en términos de estrés térmico y percepción térmica.

UTCI [°C]	Categoría de estrés	Nivel de confort
> 46	estrés de calor extremo	calor extremo
38 ~ 46	estrés de calor muy severo	muy caluroso
32 ~ 38	estrés de calor severo	caluroso
26 ~ 32	estrés de calor moderado	cálido
9 ~ 26	sin estrés por calor	comfortable
0 ~ 9	estres por frio ligero	fresco
-13 ~ 0	estres por frio moderado	muy fresco
-27 ~ -13	estrés por frío severo	frío
-40 ~ -27	estres por frio muy severo	muy frío
< -40	estres por frio extremo	frío extremo

Para el cálculo del índice UTCI se utilizó el programa RayMan pro (Matzarakis et al., 2010). Teniendo en cuenta que la exposición de las personas a la radiación de onda larga y onda corta tiene una influencia importante en su equilibrio energético, es necesario poder medir el efecto que causan estos flujos radiativos sobre el ser humano. Para poder parametrizar este efecto se utiliza la temperatura media radiante, el cual es una de las variables de entrada del modelo Fiala. La temperatura media radiante es el parámetro meteorológico más importante que afecta el equilibrio energético humano en condiciones soleadas (Matzarakis et al., 2007). Este se define como la temperatura uniforme de una superficie esférica hipotética que rodea a un ser humano (emisividad $\epsilon = 1$) que da como resultado el mismo intercambio neto de energía radiativa entre el ser humano y el entorno en que se encuentra. Mediante el programa RayMan pro se calculan los flujos radiativos de onda corta y onda larga dando como resultado la temperatura media radiante que es utilizada para el cálculo de índices de estrés térmico. Las variables que se utilizaron para calcular este parámetro y el índice fueron la temperatura del aire [°C], humedad relativa [%], intensidad del viento [km/h] y

nubosidad [octas] para cinco horas de referencia a lo largo del día: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

La primera consideración que se tuvo que tener en cuenta es que el programa solo acepta unidades de m/s (metros sobre segundo) para la variable intensidad del viento, por lo que se tuvo que realizar una conversión de los datos observados para cumplir con este requerimiento. En segundo lugar, el programa solo acepta datos de intensidad iguales o mayores a 0.5 m/s por lo que los datos de intensidad de viento observados entre 0.1 y 0.4 m/s se los consideró como 0.5 m/s de intensidad para no perder esa información (Fröhlich et al., 2015). Una vez realizado estos ajustes se introdujeron los datos en el programa Rayman Pro y se obtuvieron los valores del índice para cada una de las horas analizadas en las estaciones meteorológicas.

2.3 Análisis estadístico

Como paso previo al estudio del UTCI, se elaboró una climatología de las variables involucradas en su cálculo (temperatura del aire, humedad relativa, viento a 10m y nubosidad en octavos) considerando valores medios y desvíos de estas variables en cada una de las horas estudiadas (6, 9, 12, 15 y 18 hora local).

2.3.1 Variación decadal e interanual del índice de estrés térmico UTCI

Inicialmente se analizaron los cambios observados en el índice a lo largo de las cuatro décadas bajo estudio. Para ello se calcularon cinco diagramas de caja (“boxplots”) para la variable UTCI en cada una de las horas estudiadas y separando los períodos cada 10 años a fin de determinar de manera gráfica cambios en las distribuciones del UTCI a lo largo de cada década. Para la detección de los valores extremos o outliers se consideraron aquellos que se encuentren por encima del percentil $75 + 1.5 \times \text{intervalo intercuartil}$ y por debajo del percentil $25 - 1.5 \times \text{intervalo intercuartil}$.

Posteriormente, se analizó la variabilidad interanual de la anomalía del índice calculando primeramente un valor promedio anual y luego su anomalía con respecto al valor promedio del periodo completo o climatología 1981-2020. Se calculó la tendencia para cada serie temporal a modo de determinar incrementos o decrecimientos

significativos en el tiempo de la variable anomalía, cuya significancia se testeó mediante el test de Mann-Kendall, el cual indica la presencia o no de componente determinista en la serie temporal. Para este test se consideró un nivel de significancia (α) del 5% y se obtuvieron los valores del estadístico que permiten determinar si se rechaza o no la hipótesis nula y por ende determinar si la serie temporal es al azar o presenta componente determinística.

Este test se desarrolla de la siguiente manera:

- 1) Se define la hipótesis nula y alternativa

H_0 : La serie es al azar

H_1 : La serie no es al azar

- 2) Se define el nivel de significancia

$\alpha = 5\%$

- 3) Se expresa el estadístico T_{calc} en donde N son la cantidad de datos de mi serie

$$T_{\text{calc}} = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^{N-1} n_i, \text{ en donde } n_i \text{ son la cantidad de valores mayores a } x_i$$

$$T_{\text{tabla}} = 0 \pm 1.96 \sqrt{\frac{4N+10}{9N(N-1)}} \quad (3)$$

Para rechazar la hipótesis nula se debe cumplir que $T_{\text{calc}} > T_{\text{tabla}}$

Por último, se calculó la diferencia entre el índice UTCI y la temperatura del aire a lo largo de todo el periodo y para cada hora de interés, y se realizó un promedio anual a fin de analizar la variación anual de esas diferencias.

2.3.2 Evaluación de las condiciones de estrés térmico severo

Con el fin de analizar especialmente las condiciones de estrés de calor severo, muy severo y extremo, se desarrollaron series temporales de frecuencias de días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para las distintas horas de referencia estudiadas. Para ello, se contó la cantidad de días de verano por año en donde se observaron valores de UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ en

cada una de las ciudades estudiadas. Para cada ciudad y cada hora se obtuvo entonces una serie temporal que representa la cantidad de días por verano con estrés térmico severo, muy severo o extremo. Se calculó la tendencia para cada serie temporal a modo de determinar incrementos o decrecimientos significativos de la variable en el tiempo y se testeó su significancia con el test de Mann-Kendall.

Por otro lado se analizaron posibles saltos en las series utilizando el test de Yamamoto (Yamamoto et. al., 1986), que considera un estadístico Y que compara la señal con el ruido, es decir, mide si el salto constituye un cambio significativo respecto de la variabilidad temporal de la serie.

El estadístico Y se define de la siguiente manera:

$$Y = \frac{|Ma - Mb|}{Ca + Cb}$$

donde Ma y Mb son las medias de un período anterior y posterior al momento en el que se analiza la existencia del salto y Ca o Cb se define como

$$Ca, b = Sa, b * tq * \frac{1}{\sqrt{n-1}}$$

en donde tq es el valor en la distribución T-Student con el nivel de significancia α elegido, Sa y Sb el desvío standard de cada período y n la cantidad de datos de cada período.

Si $Y > 1$ hay salto, por lo que las submuestras Ma y Mb pertenecen a poblaciones estadísticamente distintas y por lo tanto la serie total es inhomogénea. En el caso de presentar varios valores $Y > 1$, luego de seleccionar diferentes períodos, se considera el año del salto el de mayor Y .

Los casos de estrés por calor severo fueron analizados considerando las direcciones de viento prevalentes, que fueron comparadas con los valores climatológicos correspondientes a cada localidad. Para ello, para cada ciudad y para cada hora de referencia con ocurrencia de situaciones de estrés severo (09, 12, 15 y 18 hora local), se graficaron histogramas de frecuencia relativa para la variable dirección del viento considerando todos los días de verano del período 1981-2020. La climatología de las frecuencias relativas por dirección de viento se obtuvo dividiendo la frecuencia absoluta de cada dirección de viento por el total de observaciones independientemente del valor

de UTCI de dicho día (histograma de climatología). Por otro lado, se consideraron solamente los días con valor de UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ y se calcularon las frecuencias relativas por dirección considerando solamente los casos en los que se cumpliera este criterio (histograma asociado a condiciones de estrés severo). De esta manera, se comparó la frecuencia relativa para cada una de las direcciones del viento entre los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ y los días con cualquier valor de índice a fin de determinar diferencias o predominancias de dirección del viento según si el valor del índice supera o no el umbral de 32°C . Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de las frecuencias relativas de dirección de viento en situaciones de estrés severo, se decidió analizar series temporales de frecuencia anual de viento en la dirección sur, sudeste y sudoeste a fin de obtener información sobre su tendencia y explorar posibles causas de la variabilidad observada en el índice UTCI.

2.3.3 Caso de estudio: evolución diaria del índice UTCI durante un período extenso anormalmente cálido durante el verano de 2023

En este caso se analizó el periodo excesivamente cálido ocurrido entre el 28 de febrero y el 14 de marzo de 2023 en la ciudad de Buenos Aires en donde, durante 15 días consecutivos, la temperatura máxima superó el percentil 90, siendo esto mismo récord histórico desde el año 1961. Por otro lado, durante el mismo periodo, se registraron dos olas de calor de 7 días de duración cada una según la definición del Servicio Meteorológico Nacional. La primera tuvo una temperatura máxima absoluta de 38°C y una mínima absoluta de 25.5°C entre los días 28 de febrero y el 6 de marzo. La segunda tuvo temperaturas absolutas máximas y mínimas de 38.9°C y 28°C respectivamente entre los días 8 y 14 de marzo. Los períodos excesivamente cálidos se definen, según el Servicio Meteorológico Nacional, como aquellos en donde las temperaturas máximas y mínimas superan ciertos umbrales que dependen de cada localidad (percentil 90 del periodo cálido octubre-marzo). Para la ciudad de Buenos Aires los umbrales son 32.3°C para la temperatura máxima y 22°C para la temperatura mínima (en ambos casos, calculados a partir del periodo 1961-2010). En este periodo anormalmente cálido analizado, se registró una temperatura máxima absoluta de 38.9°C y una temperatura máxima promedio de 35.6°C . Para las olas de calor, se

considera que se deben dar de manera simultánea y durante al menos 3 días consecutivos temperaturas máximas y mínimas por encima de los umbrales de máximas y mínimas de 32.3°C y 22°C respectivamente (fuente: Servicio Meteorológico Nacional, <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>, acceso noviembre 2024).

Se calculó el índice UTCI en cada hora principal para todos los días del periodo analizado y se graficaron series temporales a fin de observar el nivel de estrés térmico existente en cada momento del día. Posteriormente se analizaron los patrones sinópticos asociados a este evento utilizando imágenes de campos de superficie, de 850 hPa y 500 hPa. Finalmente, se graficaron los valores de humedad relativa, nubosidad, intensidad del viento y la diferencia entre la temperatura del aire y el índice UTCI de cada día del período de estudio con el fin de determinar qué variable influyó más en esta diferencia entre la temperatura ambiente y la percibida por el humano.

3. Análisis climatológico de las variables que conforman el índice UTCI

A fin de determinar las condiciones climatológicas normales correspondientes al periodo analizado, se realizó un promedio de las variables meteorológicas bajo estudio en las tres localidades y para cada una de las horas de interés. Analizando los valores normales en cada hora en la Ciudad de Córdoba (**tabla 3.1**), y de acuerdo a lo esperado por el balance radiativo, se observa el valor más alto de temperatura del aire y el más bajo de humedad relativa a las 15 horas (27.6°C y 52.9% respectivamente). Por otro lado, los valores más bajos de temperatura del aire y más altos de humedad relativa se dan a las 06 horas (18.2°C y 83.5%). En cuanto a la intensidad del viento y nubosidad, se observan los menores valores a las 6h (1.8 m/s y 3.8 octas) mientras que los mayores se dan en horas de la tarde (5.2 m/s y 4.4 octas). En la Ciudad de Buenos Aires (**tabla 3.2**) y la ciudad de Rosario (**tabla 3.3**), se da un comportamiento similar al de la ciudad de Córdoba, con temperaturas más altas a las 15h y valores de humedad relativa más bajos en el mismo horario. Los valores más altos de temperatura del aire se observaron en la ciudad de Rosario a las 15h, con un promedio para la estación de verano de 28.5°C (0.6°C más que Buenos Aires) y los mayores valores de humedad relativa también se registran en la ciudad de Rosario (87.1%) a las 6h. Buenos Aires registra menores valores de intensidad de viento y nubosidad respecto a Rosario y Córdoba en horas de la tarde, siendo esta última ciudad la que presenta los mayores valores de las variables mencionadas a las 15h y 18h.

La temperatura y la humedad relativa tienen una mayor variabilidad al mediodía y en horas de la tarde en relación a lo observado en horas de la mañana en las tres ciudades bajo estudio. Lo mismo se observa para la intensidad de viento, pero solo para la ciudad de Córdoba. Buenos Aires y Rosario prácticamente no registran diferencias de desvío estándar en las distintas horas consideradas. Con respecto a la nubosidad, solo se destaca una disminución de la variabilidad a medida que avanzan las horas del día en la ciudad de Córdoba.

Tabla 3.1 Datos climatológicos por hora en ciudad de Córdoba, período verano 1981-2020

Prom: promedios SD: desvío estándar

Hora local	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]		Intensidad del viento [m/s]		Nubosidad [octas]	
	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD
6	18.2	3.0	83.5	12.1	2.3	1.8	3.8	3.2
9	21.7	3.4	72.2	16.0	3.2	2.5	4.1	3.1
12	25.6	4.4	58.5	17.6	4.7	2.8	4.2	2.8
15	27.6	4.5	52.9	17.3	5.2	2.7	4.4	2.6
18	27.2	4.3	53.9	17.6	5.2	2.6	4.1	2.6

Tabla 3.2 Datos climatológicos por hora en ciudad de Buenos Aires, periodo verano 1981-2020

Hora local	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]		Intensidad del viento [m/s]		Nubosidad [octas]	
	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD
6	20.3	3.5	79.6	11.3	2.6	1.8	3.3	3.1
9	22.9	3.2	69.7	13.2	3.0	1.7	3.6	3.2
12	26.3	3.7	57.5	14.9	3.2	1.7	3.7	3.0
15	27.9	3.8	51.5	15.4	3.4	1.7	3.7	2.9
18	27.2	3.8	53.4	15.6	3.3	1.7	3.4	3.0

Tabla 3.3 Datos climatológicos por hora en ciudad de Rosario, período verano 1981-2020

Hora local	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]		Intensidad del viento [m/s]		Nubosidad [octas]	
	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD	Prom	SD
6	18.8	3.5	87.1	9.3	2.6	2.7	3.1	3.2
9	22.8	3.3	72.9	13.6	4.1	2.7	3.6	3.2
12	26.7	3.9	58.0	16.0	4.8	2.7	3.9	3.0
15	28.5	4.0	51.1	16.5	4.9	2.7	4.0	2.8
18	28.3	3.9	51.5	16.8	4.6	2.6	3.5	2.9

4. Climatología y variabilidad temporal del índice de estrés térmico UTCI

4.1 Climatología del índice UTCI y variabilidad decadal

El primer paso en el análisis del UTCI, fue su caracterización a través de los valores de posición (mediana y cuartiles), valores medios, así como también sus valores extremos en cada una de las cuatro décadas estudiadas.

La distribución empírica de los valores del índice UTCI, para las distintas localidades y horarios, están presentadas en las figuras 4.1 (Córdoba), 4.2 (Buenos Aires) y 4.3 (Rosario). En estas figuras se muestran gráficos de caja (“boxplots”) que representan los percentiles 25 y 75 (bordes de las cajas), la mediana (línea central de la caja), la media (punto verde) y los valores extremos o “outliers” (puntos negros por fuera de las cajas). Estas distribuciones fueron calculadas para cada una de las cuatro décadas del periodo estudiado reflejando algunas características de la variabilidad decadal del índice.

En primer lugar se analiza el gráfico correspondiente a la ciudad de Córdoba (**Figura 4.1**). En el mismo se puede observar que los valores más altos del índice se dan a las horas del mediodía y principios de la tarde (12 y 15 hora local) y que los valores medios tienen un leve descenso en la segunda década y vuelven a aumentar a partir de la tercera. A las 15h se destaca que más del 75% de los datos supera el umbral moderado y entre el 25% y 50% se encuentra con condiciones de estrés severo. Además, en la primera y última década, se registraron las condiciones más severas con casi 50% de los datos dentro de ese umbral. No se observa en ninguna de las horas un aumento de los valores medios a lo largo de las décadas; de hecho, para la hora 6 se destaca una disminución de este valor medio.

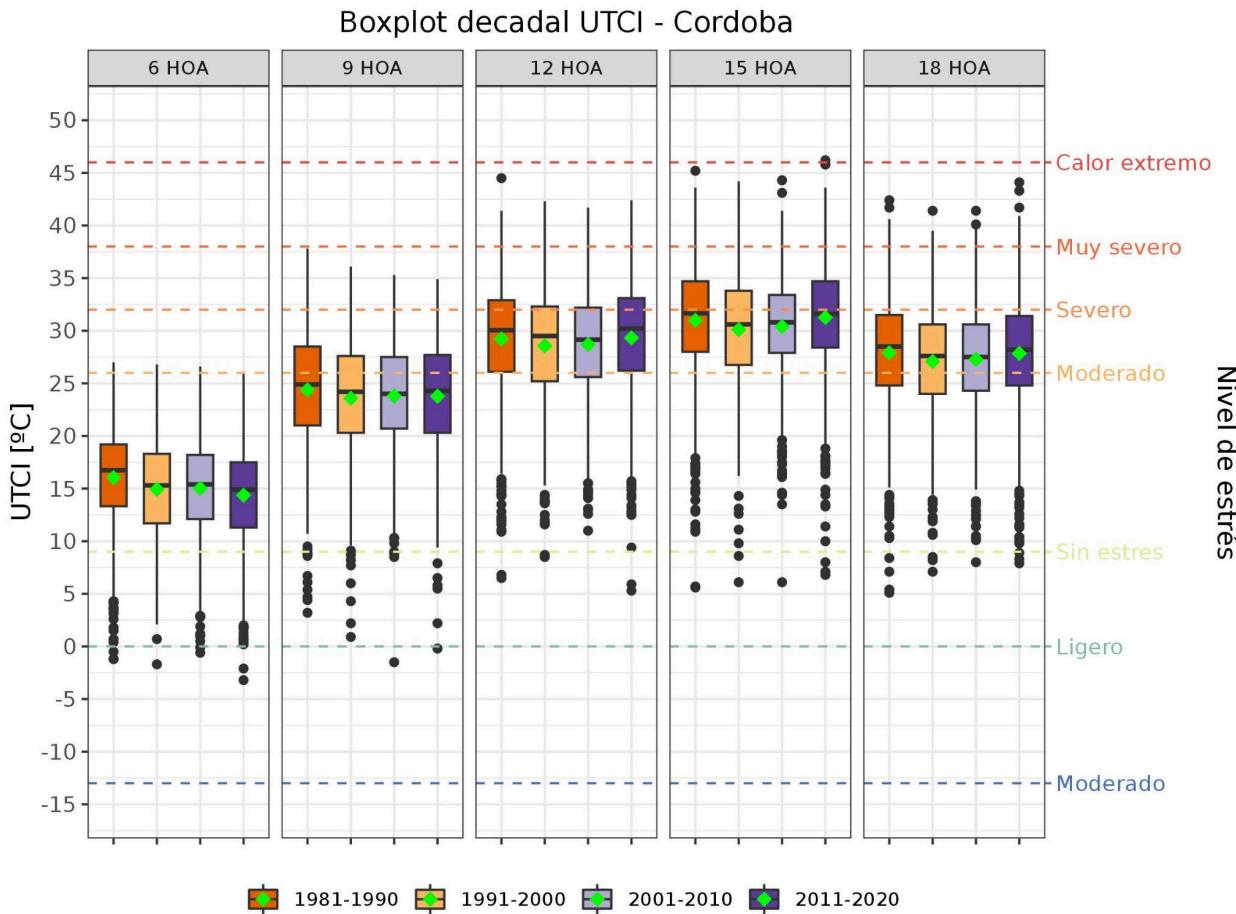


Figura 4.1 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Córdoba.

En la **Figura 4.2**, correspondiente a la ciudad de Buenos Aires, se observan también que los valores más altos del índice se encuentran en las horas 12 y 15, y mayor porcentaje de datos por encima del umbral severo para las 15 hs en la primera, tercera y cuarta década. En promedio, la década 1991-2000 es la que registró los menores valores de UTCI en todas las horas estudiadas.

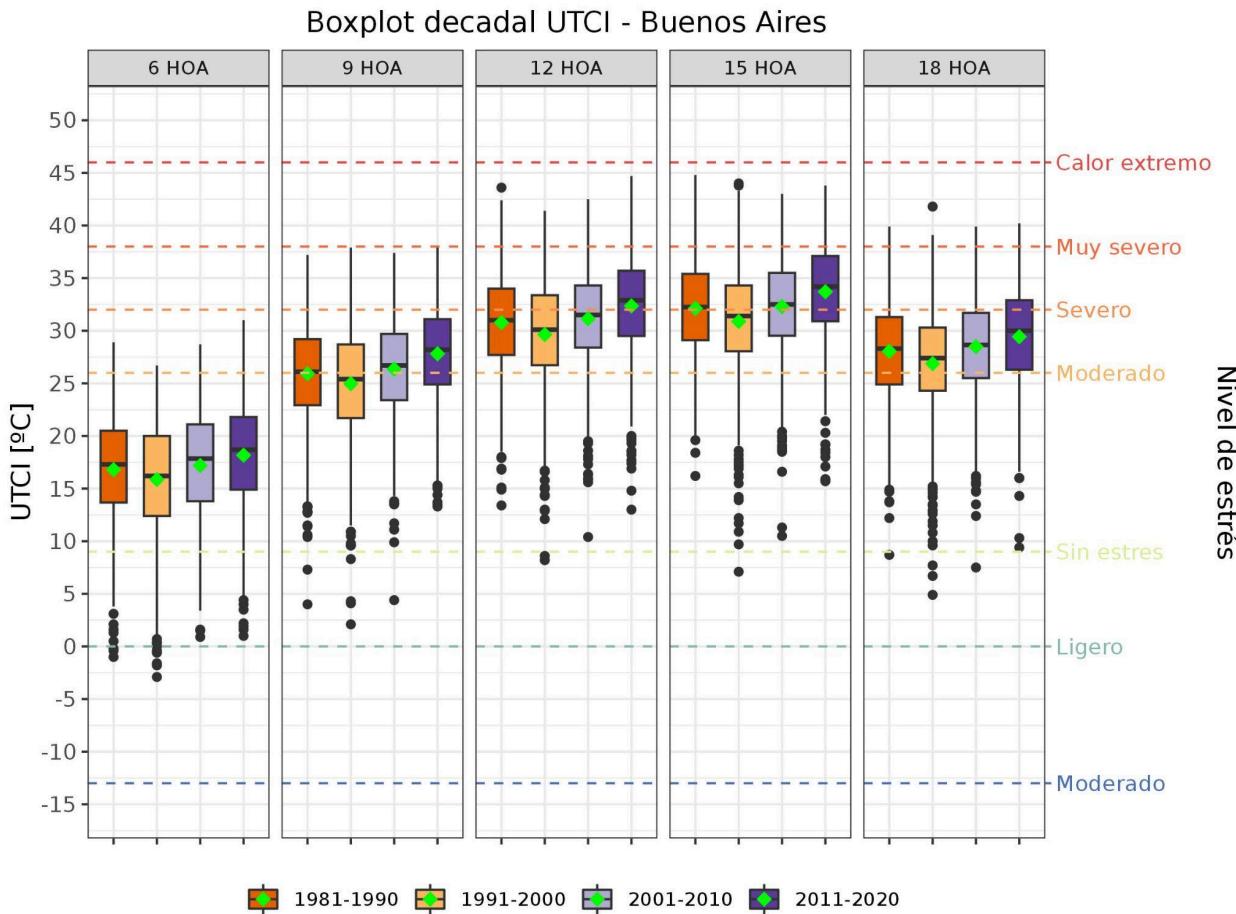


Figura 4.2 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Buenos Aires.

Al igual que lo observado en las ciudades de Córdoba y Buenos Aires, la ciudad de Rosario presenta también los máximos valores del índice en las horas 12 y 15 y un aumento de los valores medios a partir de la tercera década (**Figura 4.3**). Por otro lado, en la hora 6 se observa un aumento de los valores medios a lo largo de las 4 décadas. Al igual que Córdoba y Buenos Aires se observa, entre las 12h y 15h, un gran porcentaje de datos por encima del umbral severo, especialmente a las 15h en donde 3 de las 4 décadas presentan más del 50% de los valores por encima de ese umbral.

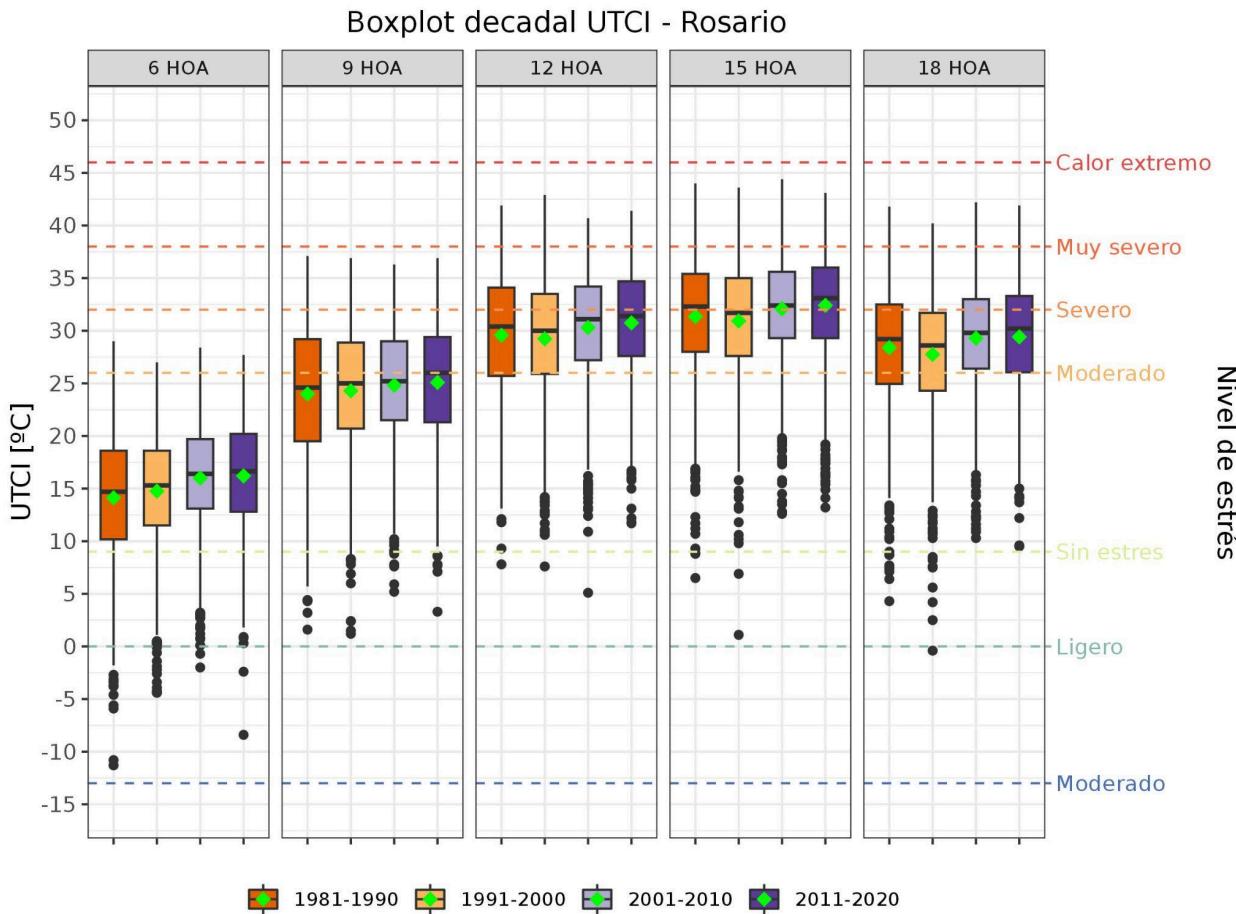


Figura 4.3 Boxplot decadal del índice UTCI para cada hora analizada en la ciudad de Rosario.

4.2 Anomalía anual del índice UTCI

En esta sección se muestran los resultados del estudio de anomalías anuales del índice UTCI con respecto al periodo de verano 1981-2020. Estos gráficos fueron realizados para cada ciudad y cada una de las horas estudiadas (6, 9, 12, 15 y 18 hora local).

En la **Figura 4.4**, correspondiente a la ciudad de Córdoba, se observa una marcada disminución de las anomalías anuales a las 06h a partir del año 2000, cuando empiezan a tomar valores mayormente negativos. En la hora 09 se observa una anomalía máxima positiva en el año 1989 y un patrón alternante en los años siguientes, con periodos de anomalías negativas seguidos por anomalías positivas y viceversa. Del mismo modo, a las 12h, 15h y 18 se observa también un máximo en el año 1989, y luego una sucesión de valores positivos y negativos para el resto de los años. Con respecto a las

tendencias (línea negra punteada), se evaluaron mediante el test de Mann-Kendall y se obtuvo tendencia negativa significativa en la hora 6 mientras que para el resto de las horas las tendencias no fueron significativas.

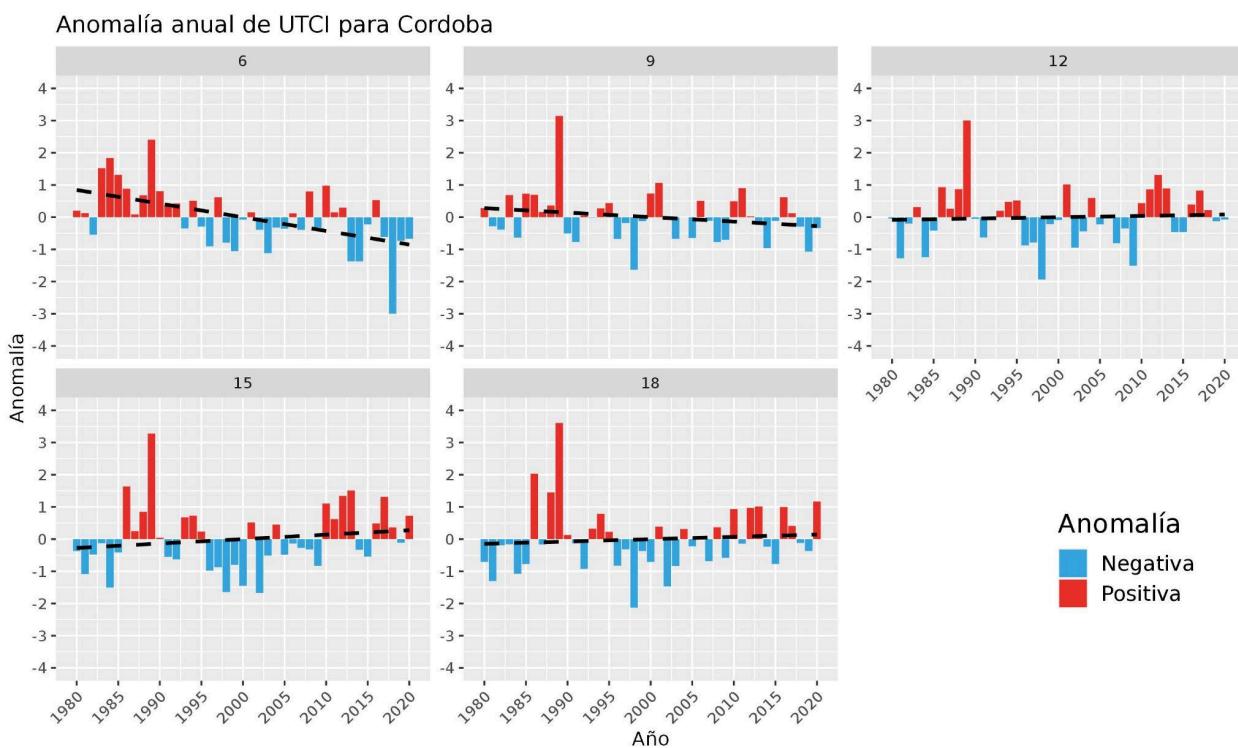


Figura 4.4 Anomalía anual del índice UTCI respecto al periodo de verano 1981-2020 para la ciudad de Córdoba a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

En la ciudad de Buenos Aires (**Figura 4.5**) se destaca una tendencia positiva significativa de las anomalías anuales del UTCI en todas las horas analizadas. Resulta interesante notar que, a partir del año 2006, todas las anomalías anuales fueron positivas, especialmente para las horas 6, 12, 15 y 18. Además, se observa una anomalía negativa máxima en el año 1998, también en todas las horas analizadas.

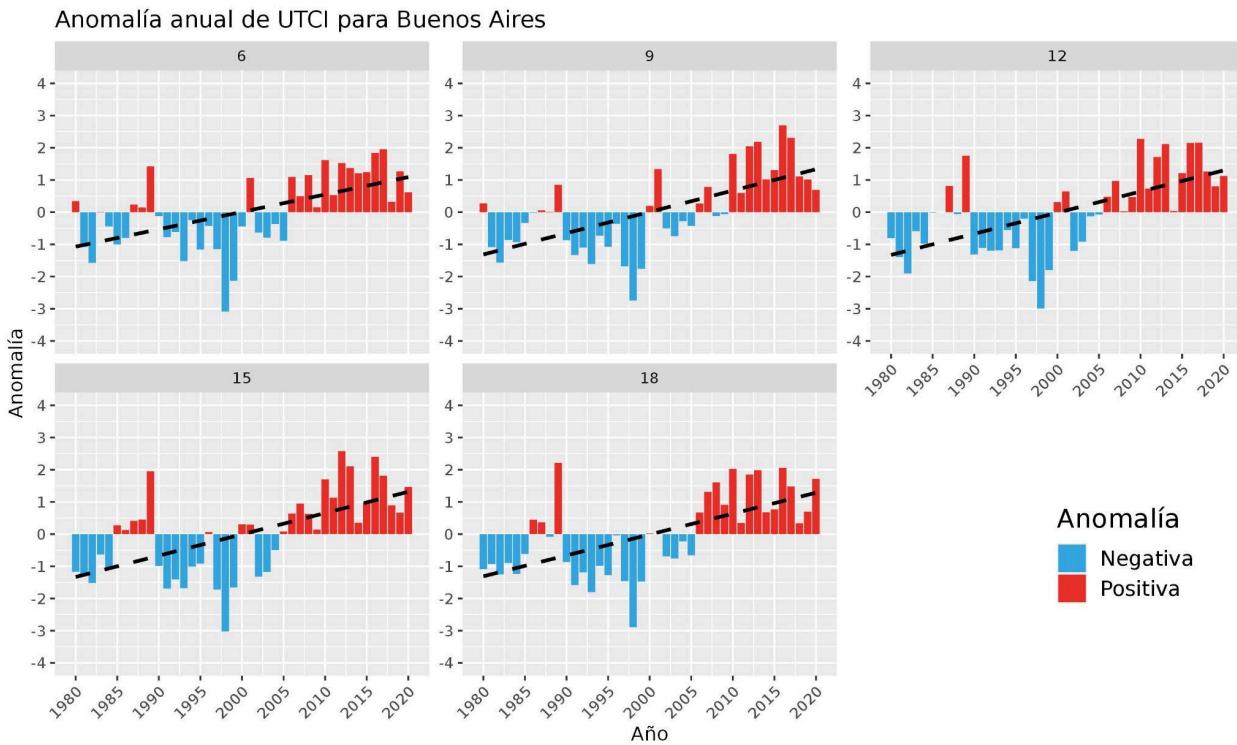


Figura 4.5 Anomalía anual del índice UTCI respecto al periodo de verano 1981-2020 para la ciudad de Buenos Aires a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

Por último en la **Figura 4.6**, para la ciudad de Rosario, se visualizan también tendencias positivas significativas en las anomalías anuales del UTCI en todas las horas analizadas. La marcada anomalía positiva del año 1989 también se evidencia en esta localidad.

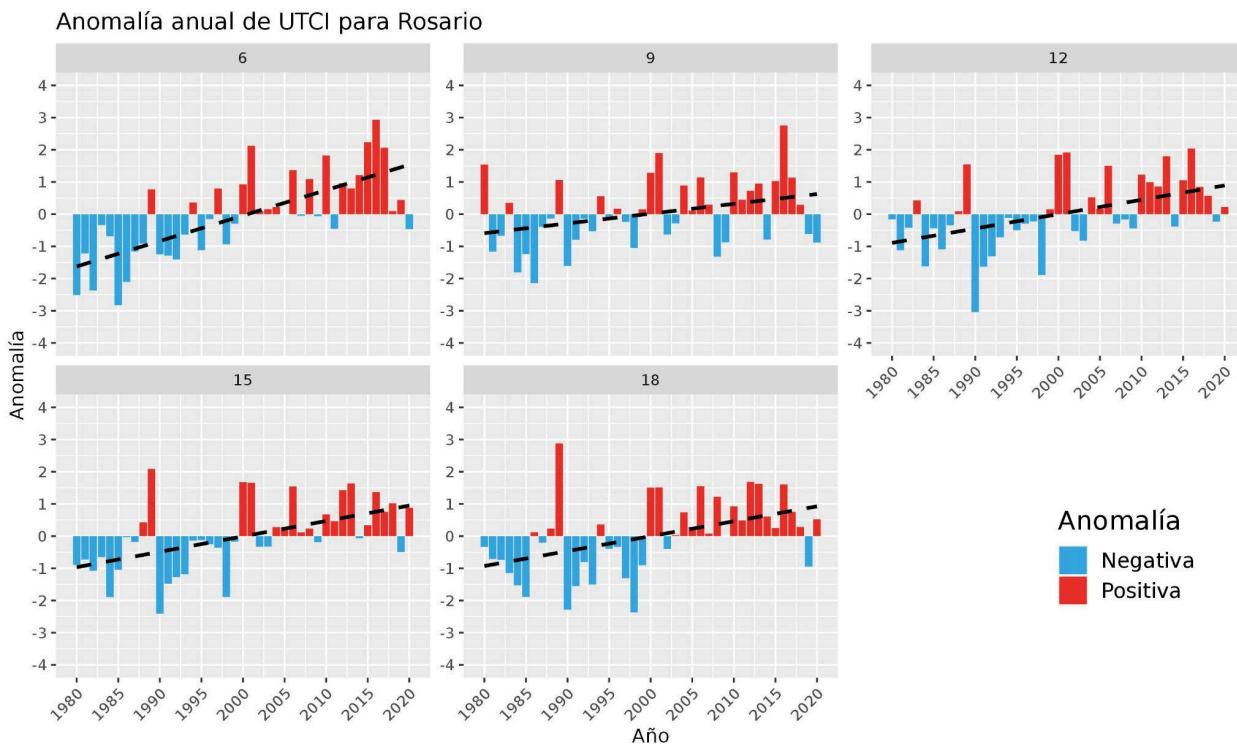


Figura 4.6 Anomalía anual del índice UTCI respecto al periodo de verano 1981-2020 para la ciudad de Rosario a las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

4.3 Análisis de la diferencia entre UTCI y la temperatura del aire

Teniendo en cuenta la existencia de un apartamiento entre los valores del índice UTCI y la temperatura del aire (Ta), se decidió calcular el promedio de la diferencia entre ambas variables para cada verano del período estudiado, a modo de mostrar posibles tendencias en el aumento del estrés térmico con respecto a la temperatura.

En la **Figura 4.7**, correspondiente a la ciudad de Córdoba, se observan tendencias negativas en todas las series temporales, aunque solo fueron significativas en las horas 6, 9 y 12. Para la hora 6, los valores de la diferencia son negativos, con tendencia negativa significativa. La percepción térmica es, por tanto, menor a la temperatura del aire a lo largo del periodo de 40 años y la brecha ha ido en aumento en términos absolutos. Además, se puede observar la mayor pendiente negativa en términos absolutos a esta hora (-0.04°C por año). También se destaca el cambio de diferencias

negativas a positivas entre las 6 y 9 h, lo que se interpreta como una percepción térmica menor a la temperatura del aire a las 6 de la mañana y una percepción térmica mayor a la temperatura del aire a las 9h. Debe destacarse que entre estos horarios se registra el mayor cambio de percepción térmica, que es mucho mayor al que se corresponde con el cambio de la temperatura en sí misma. Las diferencias entre el UTCI y la temperatura en ambas horas presentan tendencias negativas, pero la interpretación de este resultado es diferente debido al signo de las diferencias. En el caso de la hora 6, las diferencias, negativas, han aumentado en valor absoluto, mientras que las de la hora 9, positivas, han disminuido.

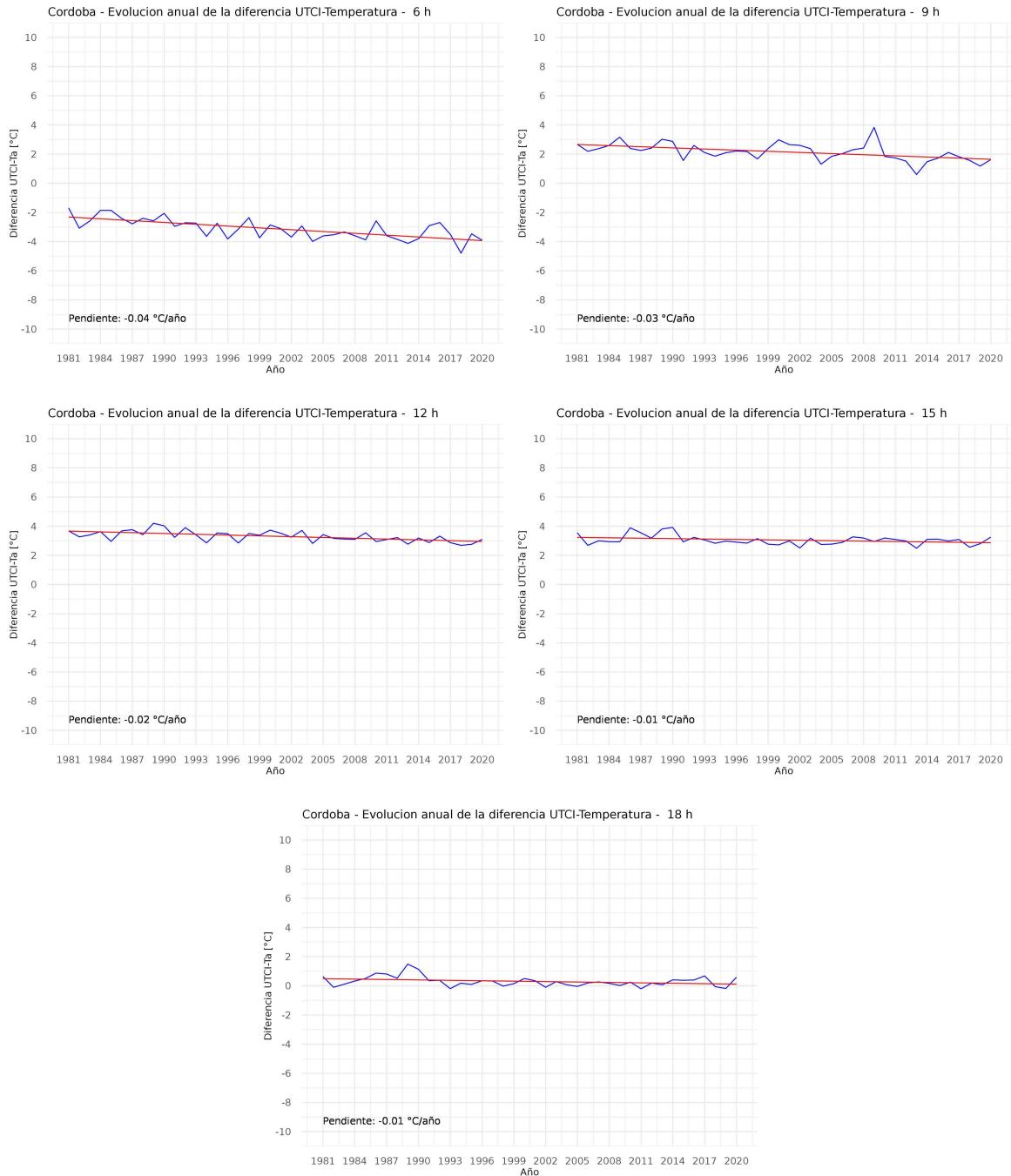


Figura 4.7 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Córdoba en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

En la **Figura 4.8** se muestran las series temporales de la ciudad de Buenos Aires en donde se encontraron tendencias positivas y significativas en las 5 horas analizadas. El

mayor incremento anual se encontró a las 9h con un valor de $0.05^{\circ}\text{C} / \text{año}$ y también se destaca en este caso el cambio de diferencias negativas a positivas entre las 6 y 9h.

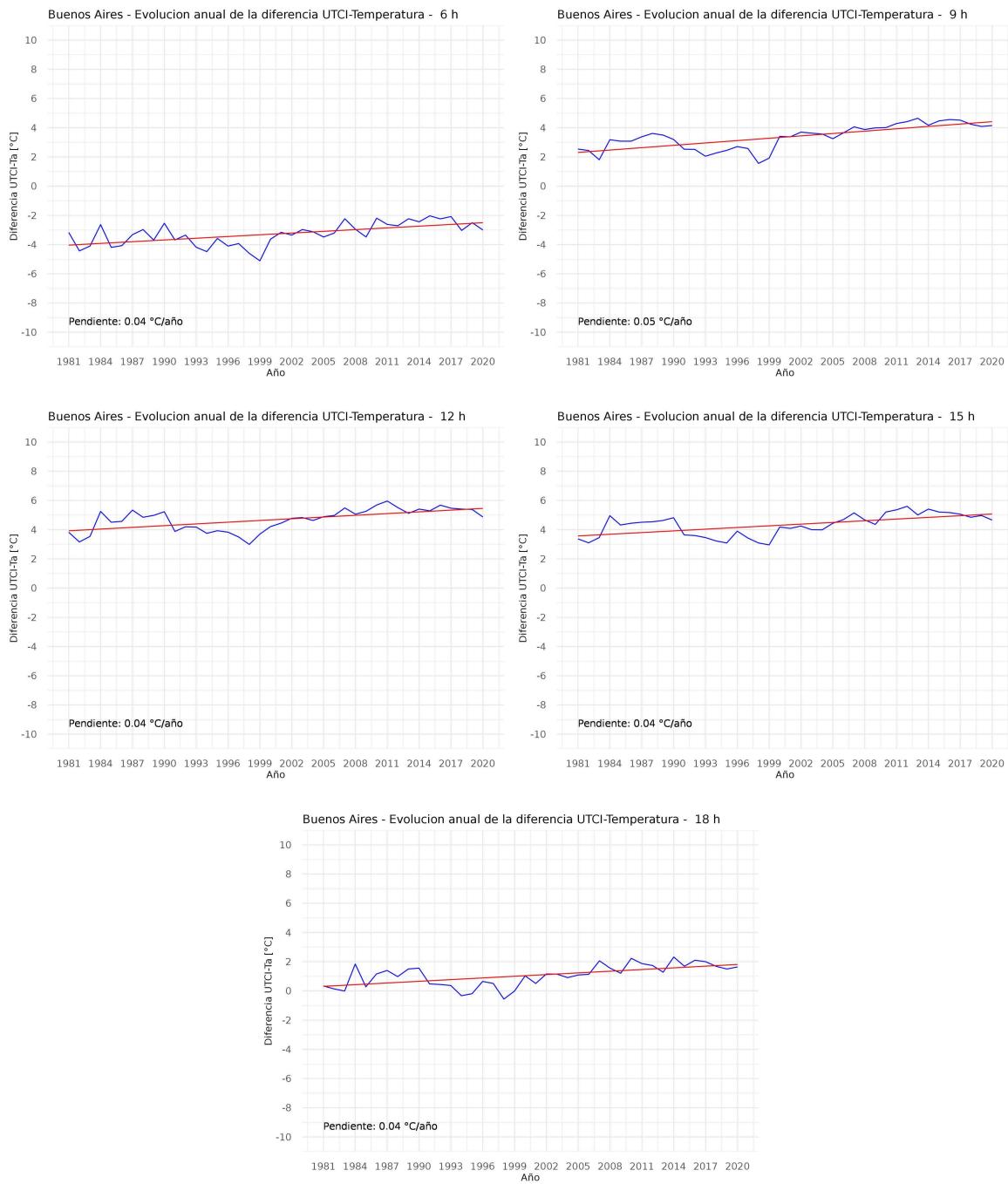


Figura 4.8 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Buenos Aires en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

Para la ciudad de Rosario (**Figura 4.9**) el comportamiento fue similar al de Buenos Aires. Se encontraron tendencias positivas y significativas en todas las horas analizadas, con excepción de las 9h, y un cambio de diferencias negativas a positivas entre las 6 y 9h.

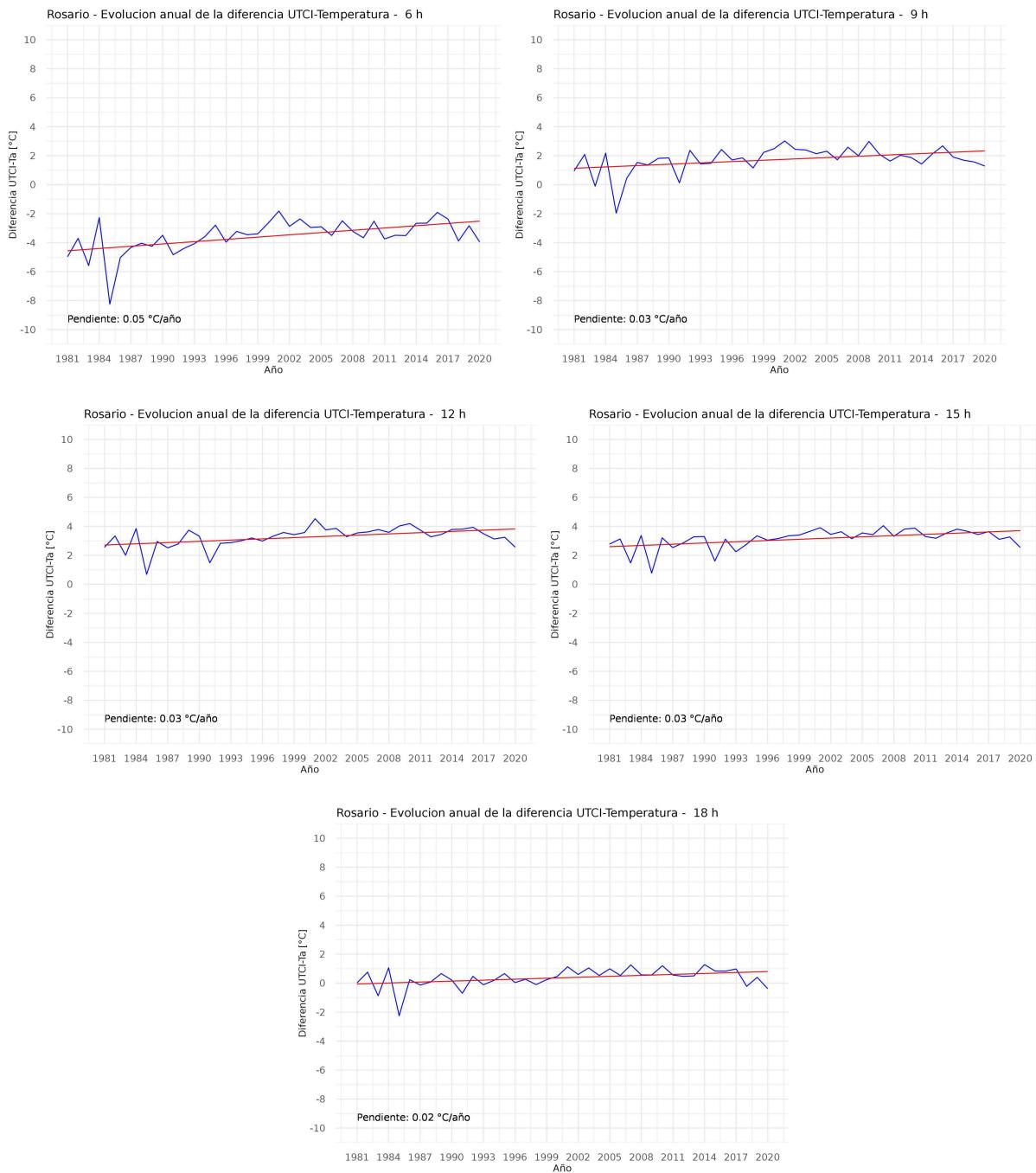


Figura 4.9 Serie temporal de la diferencia UTCI-Ta para la ciudad de Rosario en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

5. Evaluación de las situaciones de estrés térmico severo o muy severo

5.1 Variabilidad interanual del índice $UTCI \geq 32^{\circ}\text{C}$

En esta sección se analiza la ocurrencia de situaciones de estrés térmico severo o muy severo para cada una de las ciudades estudiadas y su variabilidad temporal en términos de tendencias. Las series temporales representan, para cada una de las horas estudiadas, la cantidad de días de verano por año en que el índice UTCI supera o iguala el valor de 32°C , el cual representa el límite a partir de donde la condición de estrés térmico pasa de moderada a severa. Cabe destacar que en ninguna estación meteorológica se superó el umbral de 32°C para la hora 06, por lo que no se la consideró para el estudio de las condiciones de estrés por calor severo.

En la **Figura 5.1** se muestran las series temporales para la ciudad de Córdoba para las horas 9, 12, 15 y 18. En todas las series se puede observar un máximo de la variable en el año 1989, en especial en la hora 15, que registró durante casi setenta días (equivalente a más de dos meses) valores de índice por encima del umbral asociado con condiciones severas. Al analizar el período completo, en ningún caso se encontró tendencia significativa en las horas analizadas.

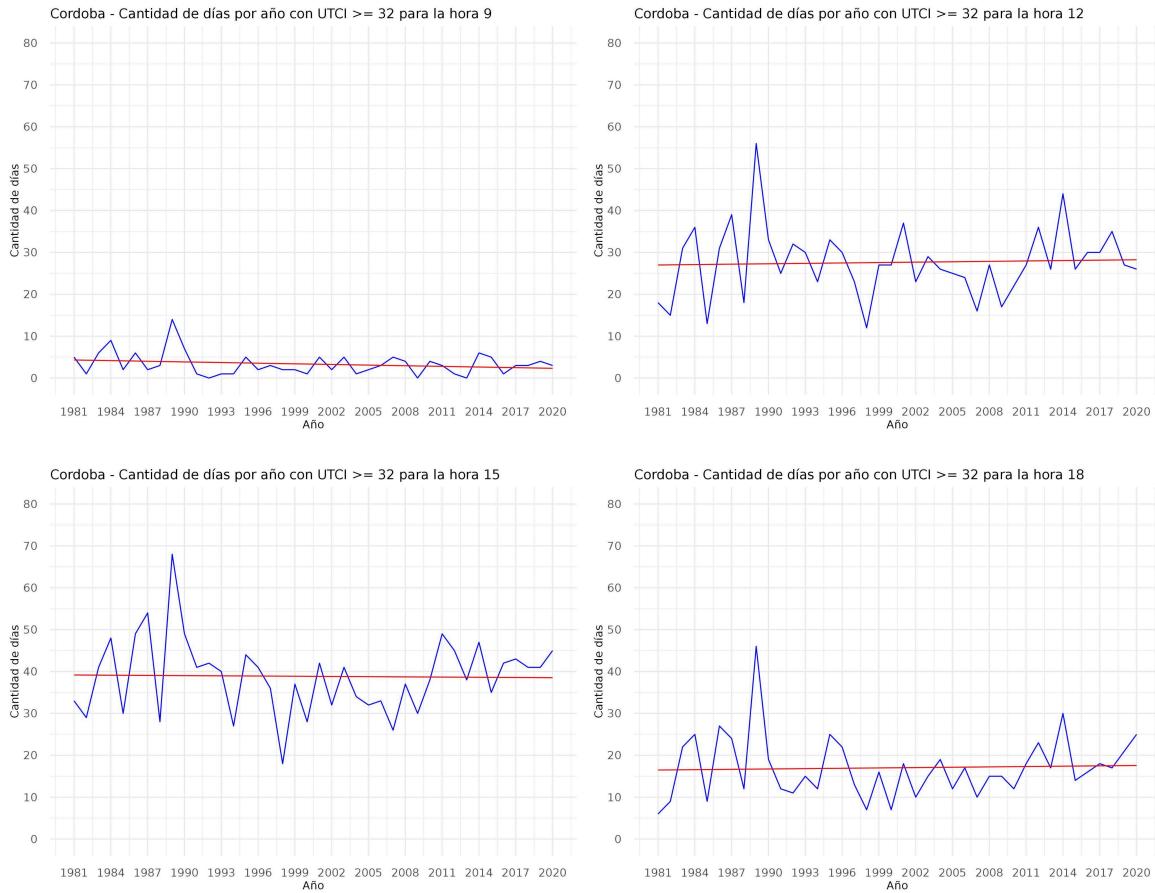


Figura 5.1 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Córdoba en las 4 horas analizadas: 09, 12, 15 y 18 hora local.

En el caso de la ciudad de Buenos Aires (**Figura 5.2**) se encontró en todas las horas un mínimo en el año 1998, en especial a las 12h, con menos de 15 días con valores de UTCI mayores o iguales a 32°C durante ese verano. Por otro lado, en el verano 2016, se encontraron más de 60 días con niveles de estrés severo (o de categoría superior) en las horas 12 y 15. Con respecto a la presencia de componente determinística, se encontraron tendencias positivas significativas en todas las series. Además, en la hora 09, luego de realizar el test de Yamamoto considerando dos períodos de 11 años y un nivel de significancia del 5%, se encontró un salto en la serie temporal entre los años 2009 y 2010.

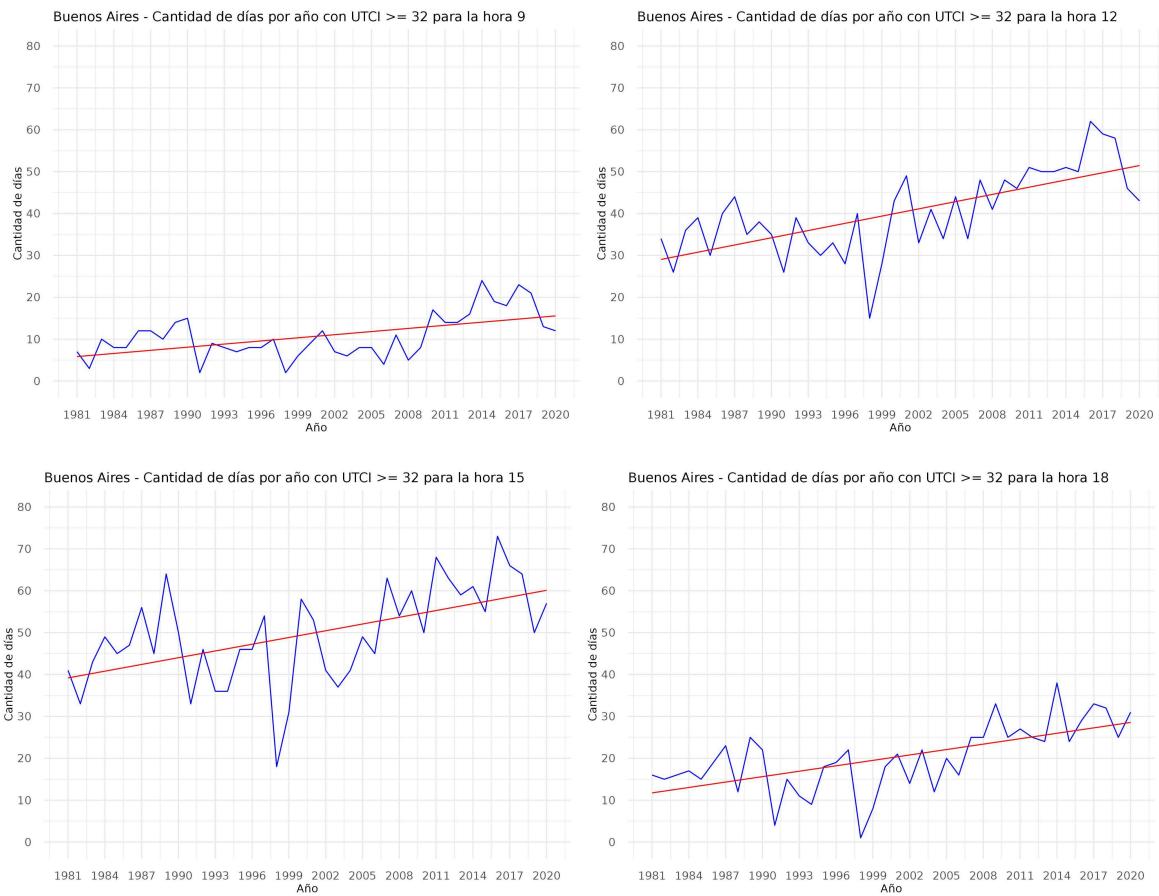


Figura 5.2 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Buenos Aires en las 4 horas analizadas: 09, 12, 15 y 18 hora local.

En el caso de la ciudad de Rosario (**Figura 5.3**) se encontró tendencia positiva significativa en las horas 15 y 18. Además se destaca, en el verano de 1989, más de 45 días con niveles de estrés severo o muy severo a las 12, 15 y 18 horas. En especial en la hora 15 se observaron más de 60 días con UTCI mayor o igual a 32°C .

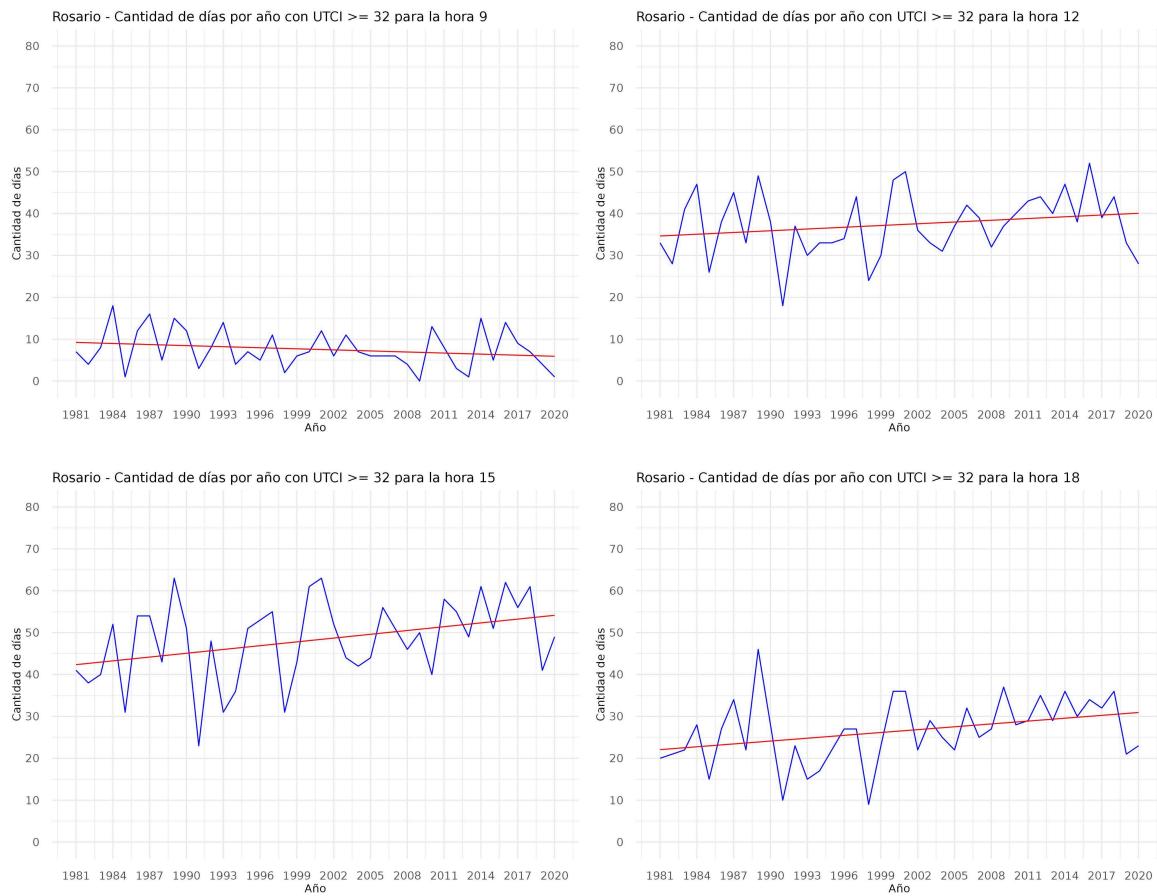


Figura 5.3 Serie temporal de cantidad de días por año con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ para la ciudad de Rosario en las 4 horas analizadas: 09, 12, 15 y 18 hora local.

5.2 Patrones del viento en situaciones estrés térmico severo

El viento cumple un rol importante en el cálculo del índice UTCI ya que su intensidad es uno de los factores, junto a la temperatura del aire, la humedad relativa y la nubosidad, que pueden alterar la percepción térmica humana. El cálculo del índice UTCI no tiene en cuenta la dirección del viento en forma directa, solamente su intensidad. Sin embargo, los cambios en la dirección del viento implican cambios en el transporte de temperatura y humedad y, por tanto, en el UTCI.

En esta sección se analiza la dirección del viento considerando la frecuencia climatológica y la que corresponde a condiciones de estrés severo.

En la ciudad de Córdoba (**Figura 5.4**) se observa, en comparación con la climatología, mayor frecuencia de viento norte y noreste en horas de la tarde, menores frecuencias del sector sur y mayores calmas a partir de las 9h. Mirando los valores más significativos se puede destacar la alta frecuencia del viento noreste observado a las 18h en situaciones de estrés severo en comparación con la climatología como también las calmas a las 9h. El valor de frecuencia cero representando para todas las componentes de viento a la hora 6 es el reflejo de la inexistencia de casos de estrés severo en este horario.

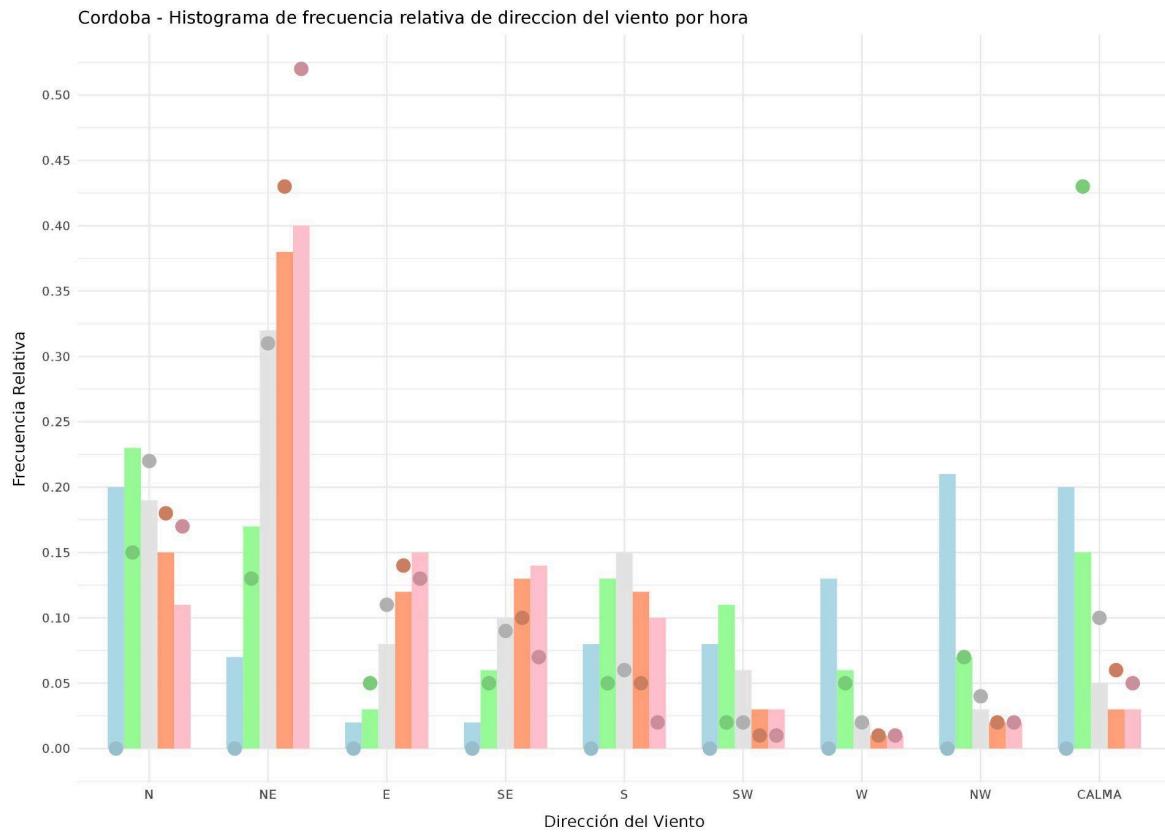


Figura 5.4 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (puntos) vs climatología (barras) para la ciudad de Córdoba en las horas 06, 09, 12, 15 y 18.

Para la ciudad de Buenos Aires (**Figura 5.5**) se observa la ausencia de situaciones de estrés severo a las 06h, menores frecuencias del sector sur, mayores frecuencias de calmas en situaciones de estrés severo en comparación con climatología y mayor proporción de frecuencias de las componentes norte, especialmente norte y noroeste en el resto de las horas estudiadas. Como dato para destacar, se encuentra la frecuencia de viento norte a las 18h y las calmas y noroeste a las 9h que fueron notablemente mayores que la climatología.

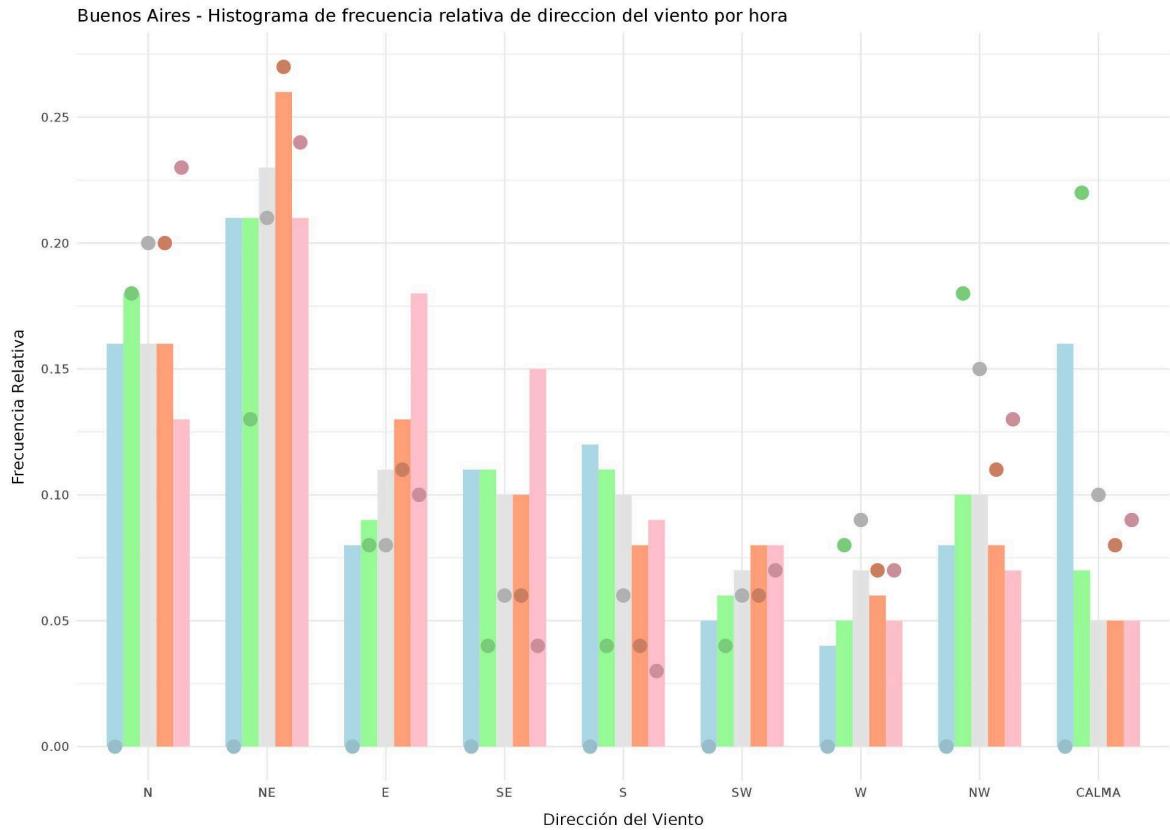


Figura 5.5 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (puntos) vs climatología (barras) para la ciudad de Buenos Aires en las horas 06, 09, 12, 15 y 18.

En el caso de la ciudad de Rosario (**Figura 5.6**) también se destaca la ausencia de días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ en la hora 06, menores frecuencias del sector sur, sudeste y sudoeste y mayores frecuencias del norte, noroeste y noreste sobre todo a partir del mediodía. En este caso se destaca principalmente la proporción de calmas en situaciones de estrés severo a las 9h en comparación con la climatología.

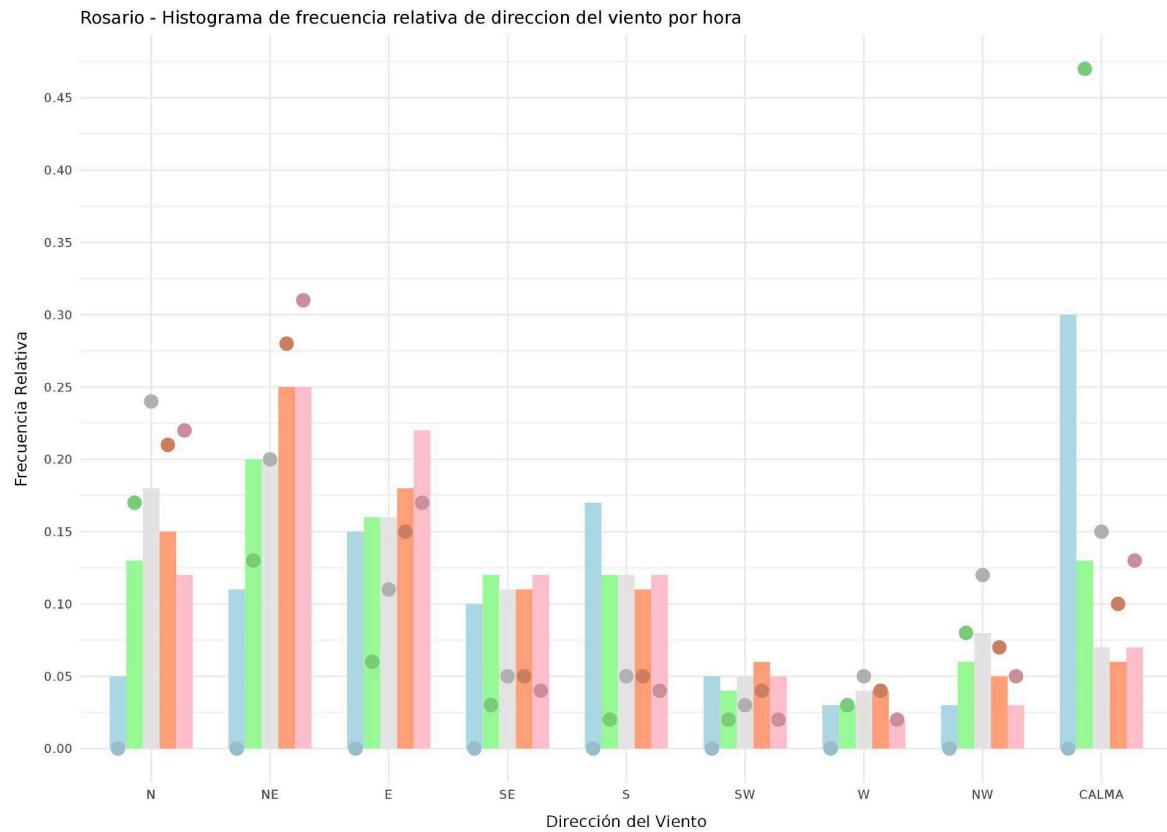


Figura 5.6 Histograma de frecuencia relativa de dirección del viento para los días con índice UTCI $\geq 32^{\circ}\text{C}$ (puntos) vs climatología (barras) para la ciudad de Rosario en las horas 06, 09, 12, 15 y 18.

En conclusión, en las situaciones de estrés severo de las tres ciudades, se han encontrado mayores frecuencias relativas en las direcciones del sector norte para las horas 12, 15 y 18. Para las 9h predominaron las calmas y no se encontraron situaciones de estrés severo a las 6h. Se destaca en todas las localidades una reducción de al menos el 50% de casos con componente sur del viento respecto a la frecuencia climatológica.

5.2.1 Análisis de la frecuencia absoluta de la componente sur del viento durante los veranos del periodo 1981-2020

Teniendo en cuenta la reducción significativa de la frecuencia de días con componente sur de viento cuando se consideraban casos de estrés severo o muy severo, se analizó la variabilidad temporal de la frecuencia de esta componente a fin de considerar potenciales relaciones con las tendencia observadas en los índices del UTCI.

En las siguientes figuras se presentan la cantidad de observaciones de componente sur en cada una de las ciudades de interés durante el periodo de verano 1981-2020. En la **Figura 5.7**, correspondiente a la ciudad de Córdoba, se encontró tendencia positiva significativa en las horas 6 y 9. En Buenos Aires (**Figura 5.8**) la tendencia fue negativa y significativa en las horas 9, 15 y 18, mientras que en la ciudad de Rosario (**Figura 5.9**) se encontró tendencia positiva y significativa a las 6h.

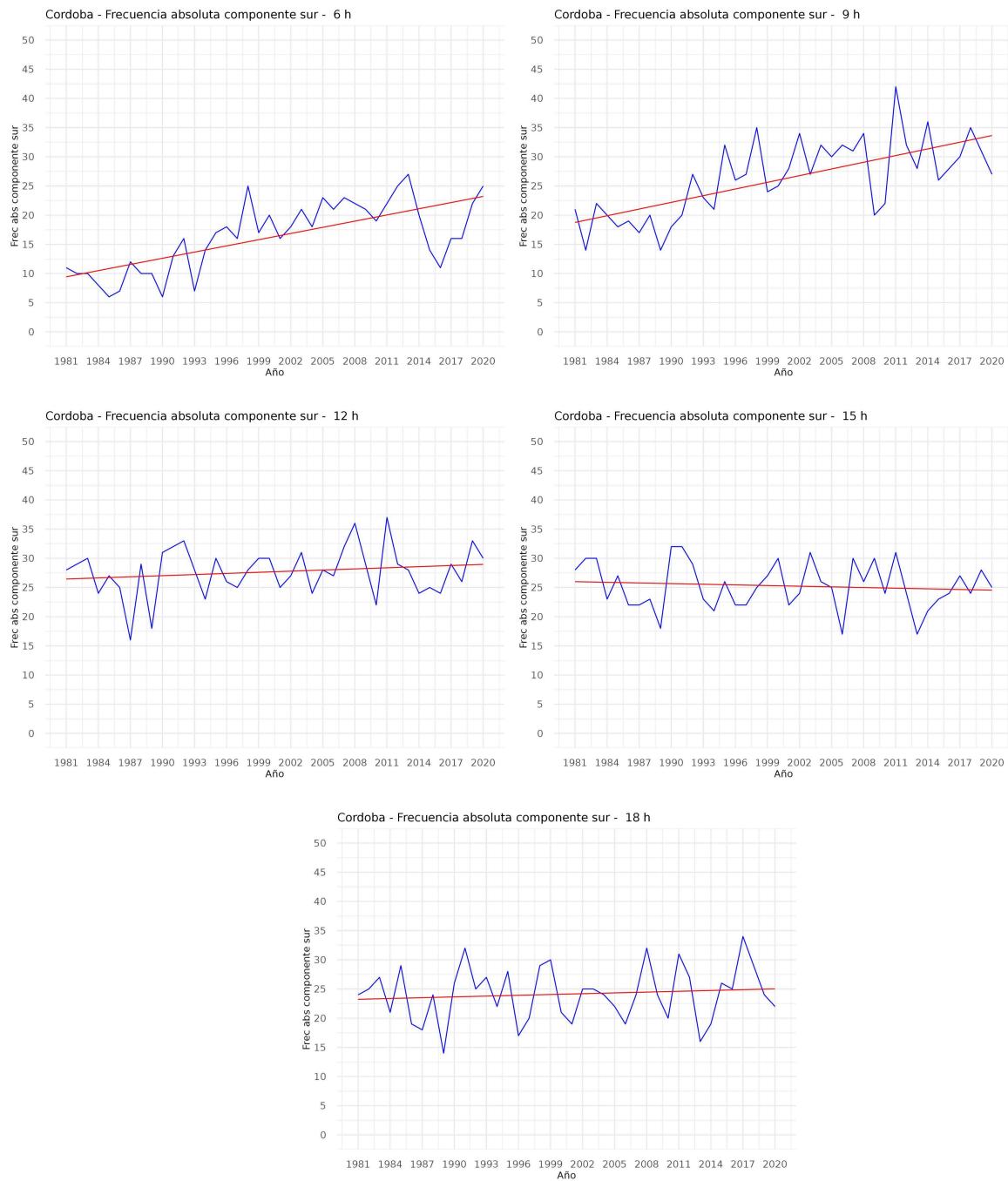


Figura 5.7 Serie temporal de frecuencia absoluta del viento con componente sur para la ciudad de Córdoba en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

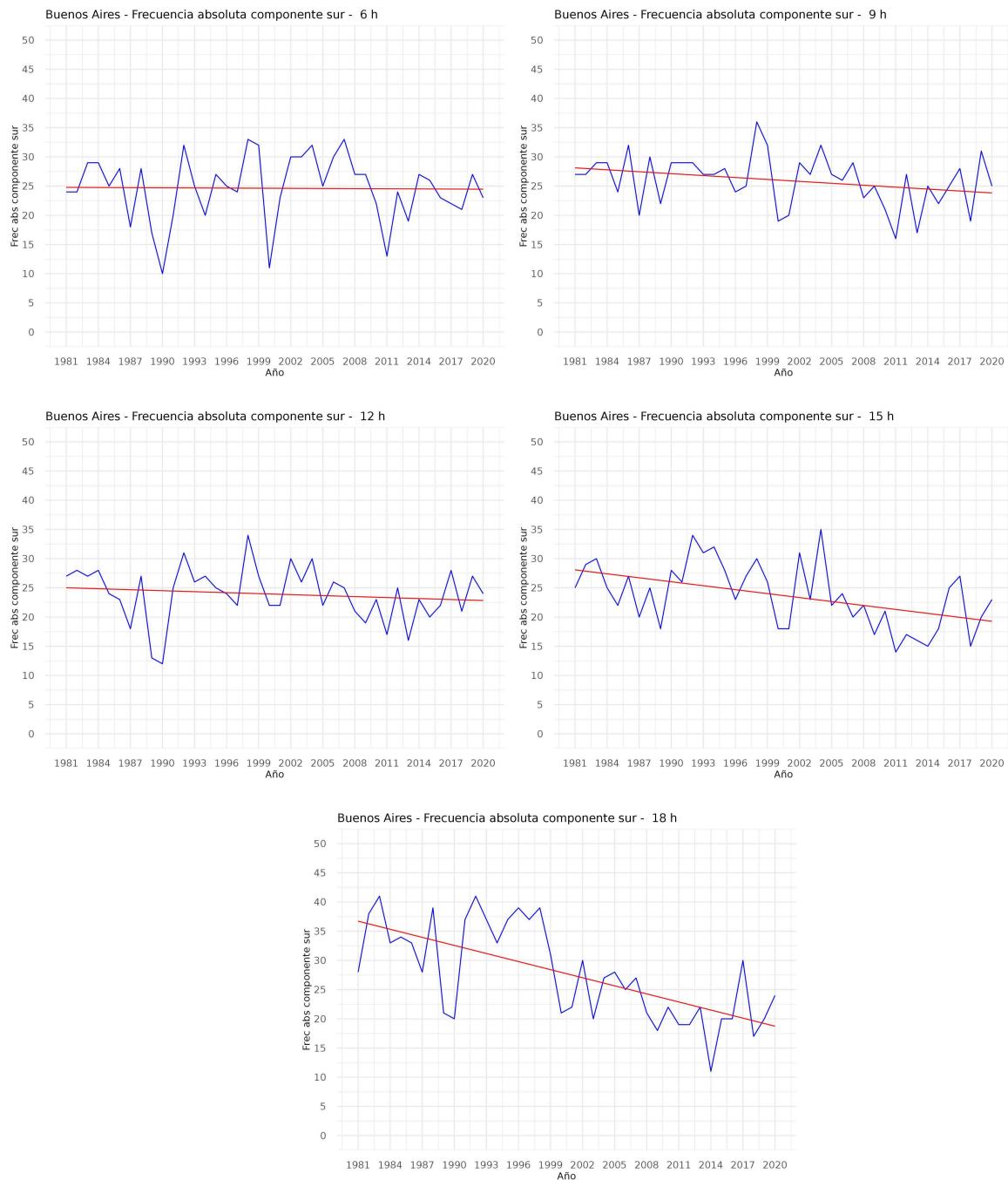


Figura 5.8 Serie temporal de frecuencia absoluta del viento con componente sur para la ciudad de Buenos Aires en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

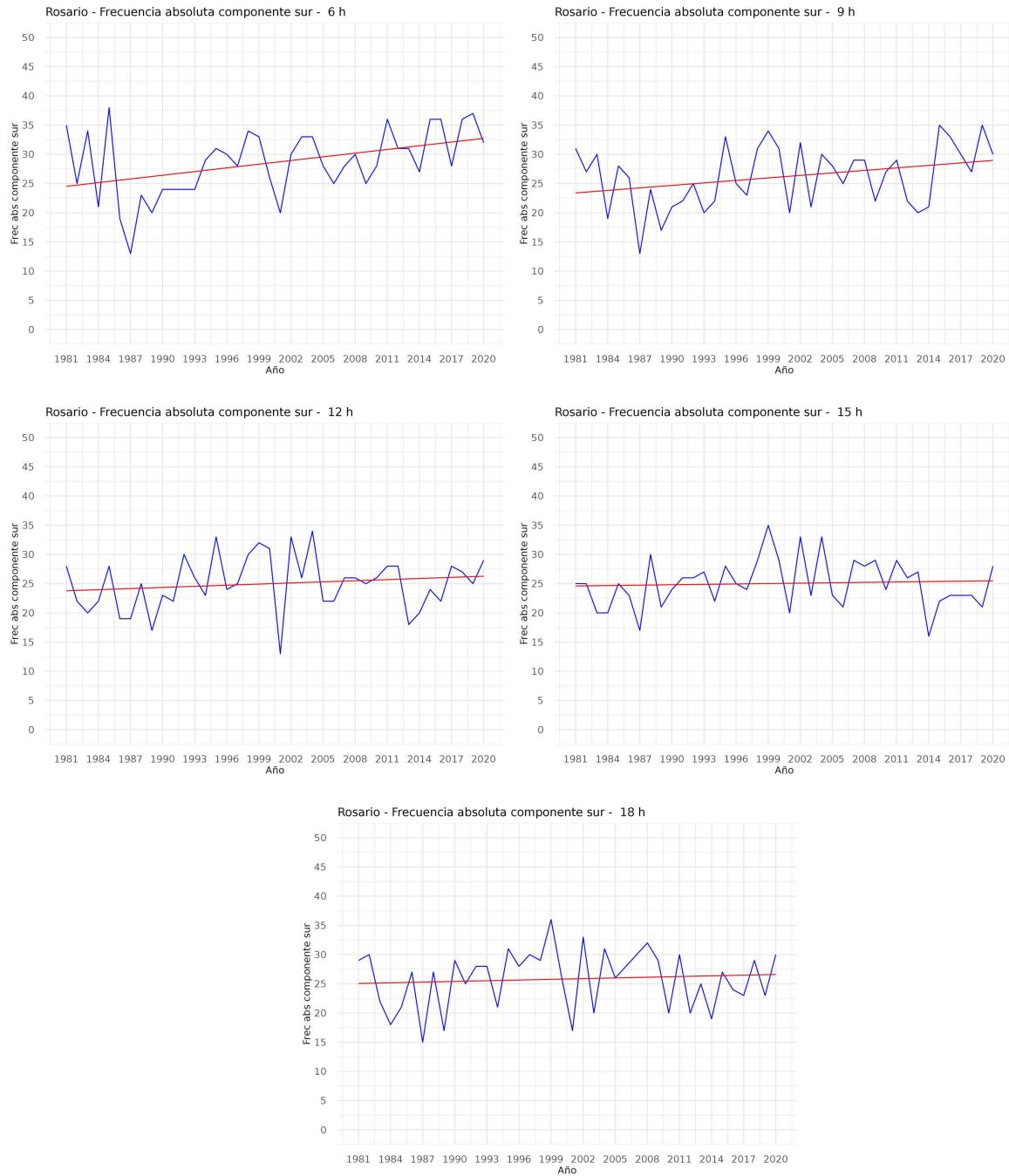


Figura 5.9 Serie temporal de frecuencia absoluta del viento con componente sur para la ciudad de Rosario en las 5 horas analizadas: 06, 09, 12, 15 y 18 hora local.

Estos resultados son consistentes con los cambios observados con el UTCI, aunque no llegan a explicar los cambios observados en su totalidad. En el caso de Córdoba, el aumento de la frecuencia del viento de componente sur es consistente con la disminución del índice UTCI en horas de la mañana, aunque no se pueden evaluar

situaciones de estrés severo a las 6 horas. En Buenos Aires, donde se registraba el mayor aumento del índice UTCI y de la frecuencia de días con estrés severo, el análisis de la frecuencia de componente sur evidenció una disminución de su frecuencia, lo que es físicamente consistente. La situación de Rosario requiere otro tipo de análisis para explicar los cambios observados en el índice UTCI y, en particular sus valores extremos, ya que solo se encontraron cambios significativos de la componente sur en la hora 6.

5.3 Análisis de dos olas de calor y un periodo récord excesivamente cálido durante el verano 2023

En esta sección se analizó el índice UTCI en la ciudad de Buenos Aires durante el período excesivamente cálido del verano 2023 para las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local, considerando la dirección del viento prevaleciente en cada horario y los patrones sinópticos asociados. Además, se hizo una comparación entre las variables viento, humedad relativa, nubosidad y la diferencia entre el UTCI y la temperatura del aire.

5.3.1 Patrones sinópticos y circulación del viento asociada

En el período analizado, del 28 de febrero al 14 de marzo de 2023, se desarrolló un sistema de alta presión (anticiclón) en superficie en la zona del Océano Atlántico Sur el cual, en interacción con una cuña en 500 hPa, se intensificó aportando humedad y temperaturas altas al centro del país. Paralelamente, una situación de bloqueo en niveles medios y altos impidió el ingreso de aire más frío y seco al área afectada promoviendo la formación de dos olas de calor consecutivas de 7 días cada una y un período excesivamente cálido de 15 días de duración (Servicio Meteorológico Nacional: Informe especial por ola de calor 2023a, 2023b).

En las **Figuras 5.10 y 5.11** se presentan los mapas de 500 hPa y 850 hPa respectivamente en donde en líneas negras continuas se indica la altura geopotencial, las flechas y barbas el viento y su intensidad, y en sombreado la anomalía de

geopotencial. En la **Figura 5.10** se puede observar la cuña en 500 hPa interactuando con el sistema de alta presión en 850 hPa produciendo la profundización de la cuña y la intensificación del anticiclón. Este movimiento semi-estacionario, que se replicó a lo largo de todo el periodo, promovió la circulación del viento del sector norte e impidió el avance de frentes fríos provenientes de sistemas de baja presión más al sur de Argentina.

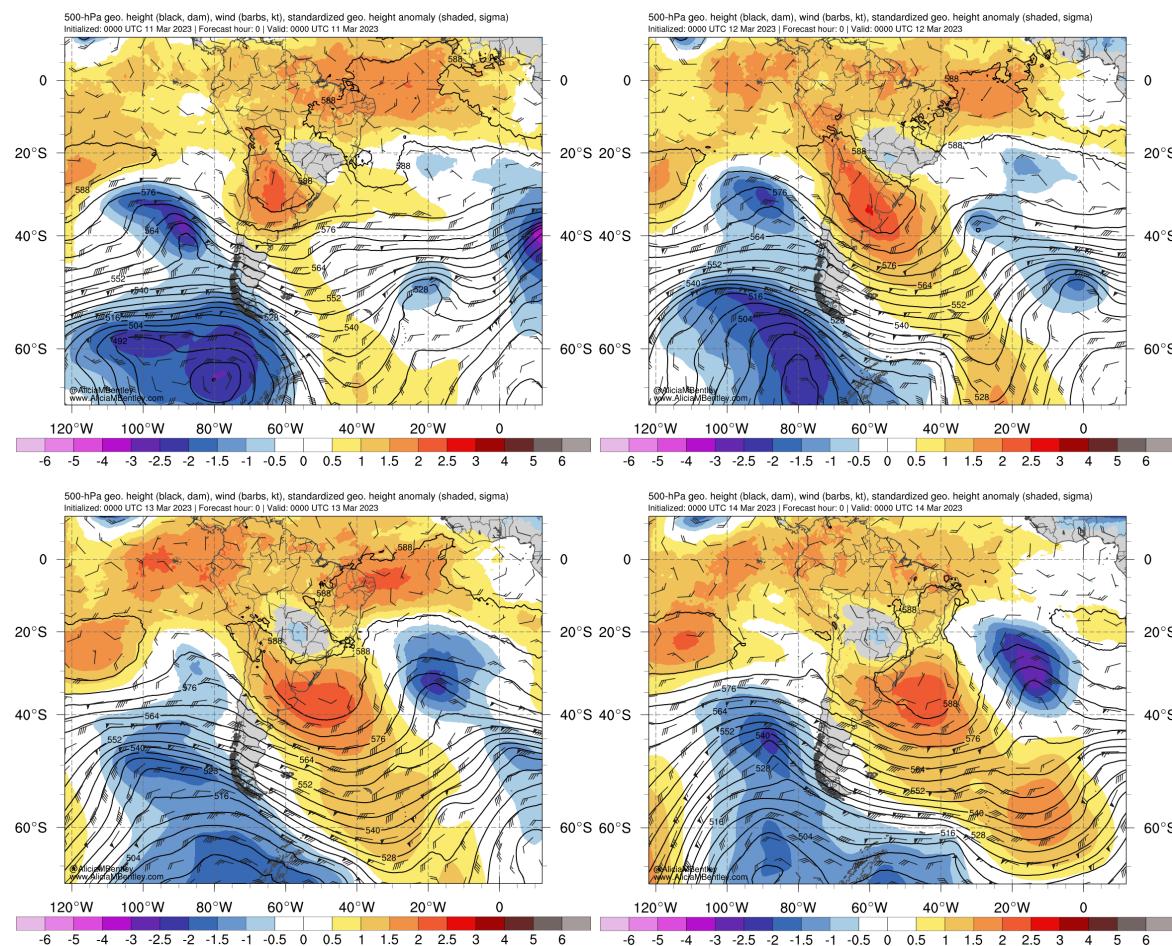


Figura 5.10 Mapas de 500 hPa a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (Fuente Real-Time GFS Maps, Alicia M. Bentley, Albany University).

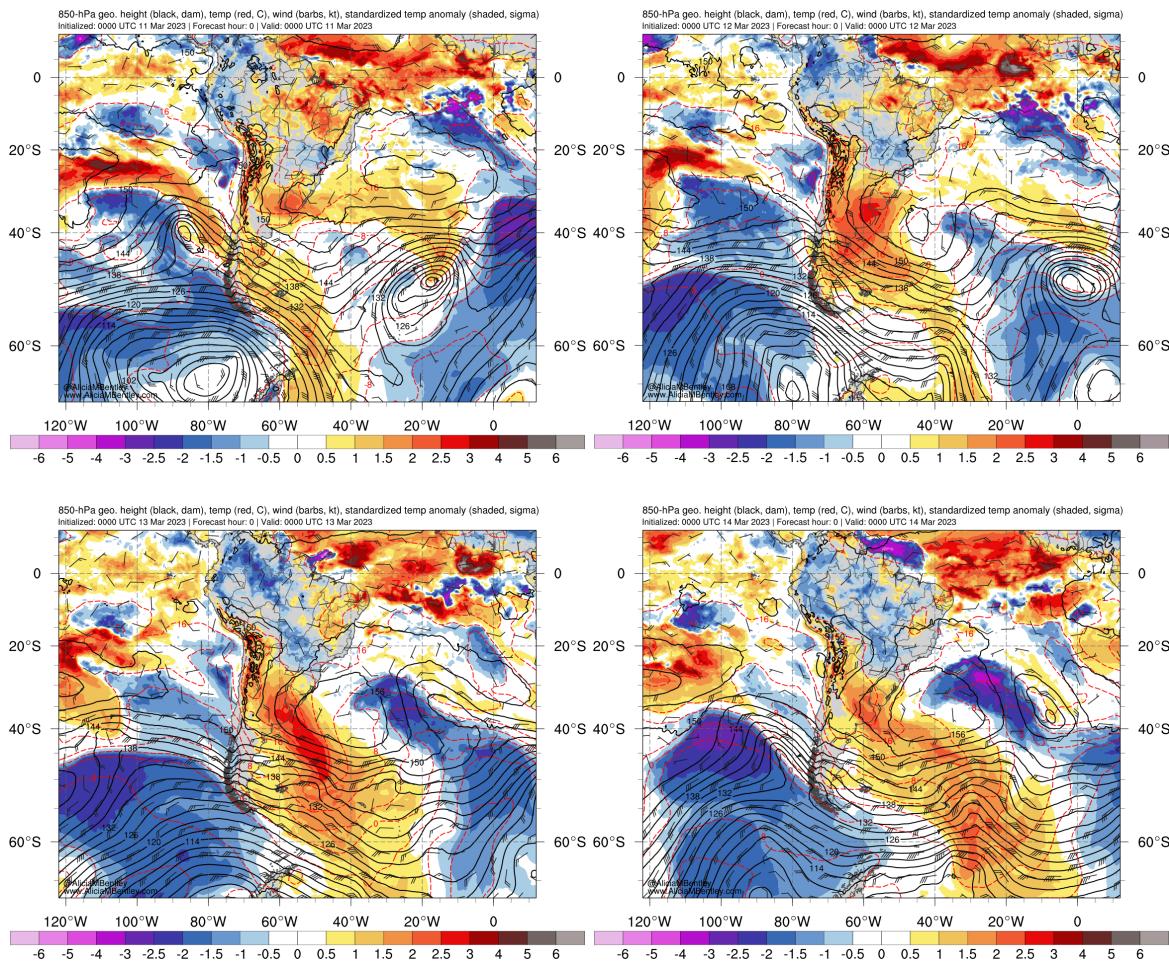


Figura 5.11 Mapas de 850 hPa a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (Fuente Real-Time GFS Maps, Alicia M. Bentley, Albany University).

Por otro lado, en las cartas de superficie (**Figura 5.12**), se visualiza para los mismos días la presencia del sistema de alta presión en la zona del océano Atlántico próximo a la costa de Buenos Aires. Este sistema impidió el avance de aire más frío y seco sobre la zona norte de Buenos Aires. Para el final del periodo, 14 de marzo aproximadamente, comienza a debilitarse el bloqueo, lo que posibilita posteriormente el avance de aire proveniente del sector sur.

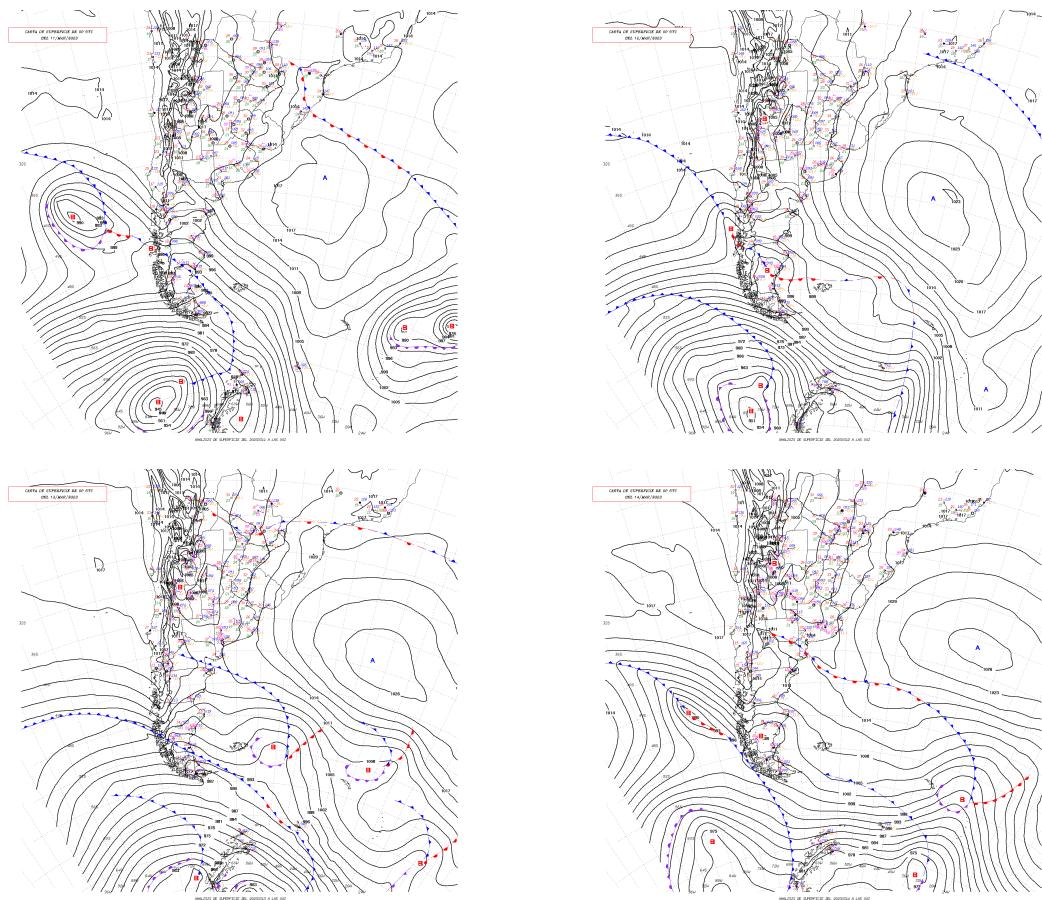


Figura 5.12 Cartas de superficie a las 00 UTC del día 11/03/2023 (arriba izq.), 12/03/2023 (arriba der.), 13/03/2023 (abajo izq.) y 14/03/2023 (abajo der.). (Fuente Servicio Meteorológico Nacional, https://repo2.smn.gob.ar/archivos/agro/analisis/gif_histórico/).

El periodo se caracterizó por tener predominancia de ingreso de aire del sector norte producto de una circulación anticiclónica que afectó a la zona cercana a Buenos Aires. Esta circulación semi-estacionaria promovió el ingreso de aire cálido y húmedo en la región.

Un análisis detallado de la frecuencia relativa de cada dirección de viento en las distintas horas consideradas en este estudio, permitió evaluar el comportamiento anómalo del periodo 28/02 al 14/03 del 2023 en relación a su climatología. La climatología se construyó tomando todos los períodos del 28/02 al 14/03 entre los años 1981 al 2020. De este modo, puede observarse en la **Figura 5.13** que, en el periodo 2023 (puntos) y en cada una de las horas analizadas, la dirección predominante del viento fue del sector norte y en menor medida del noroeste. En particular, la frecuencia

de la componente norte duplica o triplica la que corresponde a la media climatológica (barras). Se destaca que en ningún momento se registró viento con componente sur o sudoeste y solo se observaron algunos casos aislados del sudeste. Por otra parte, se registró una menor frecuencia de la componente noreste del viento respecto a la climatología en 4 de las 5 horas relevadas. Las calmas fueron escasas en la hora 6, y nulas en el resto de las horas.

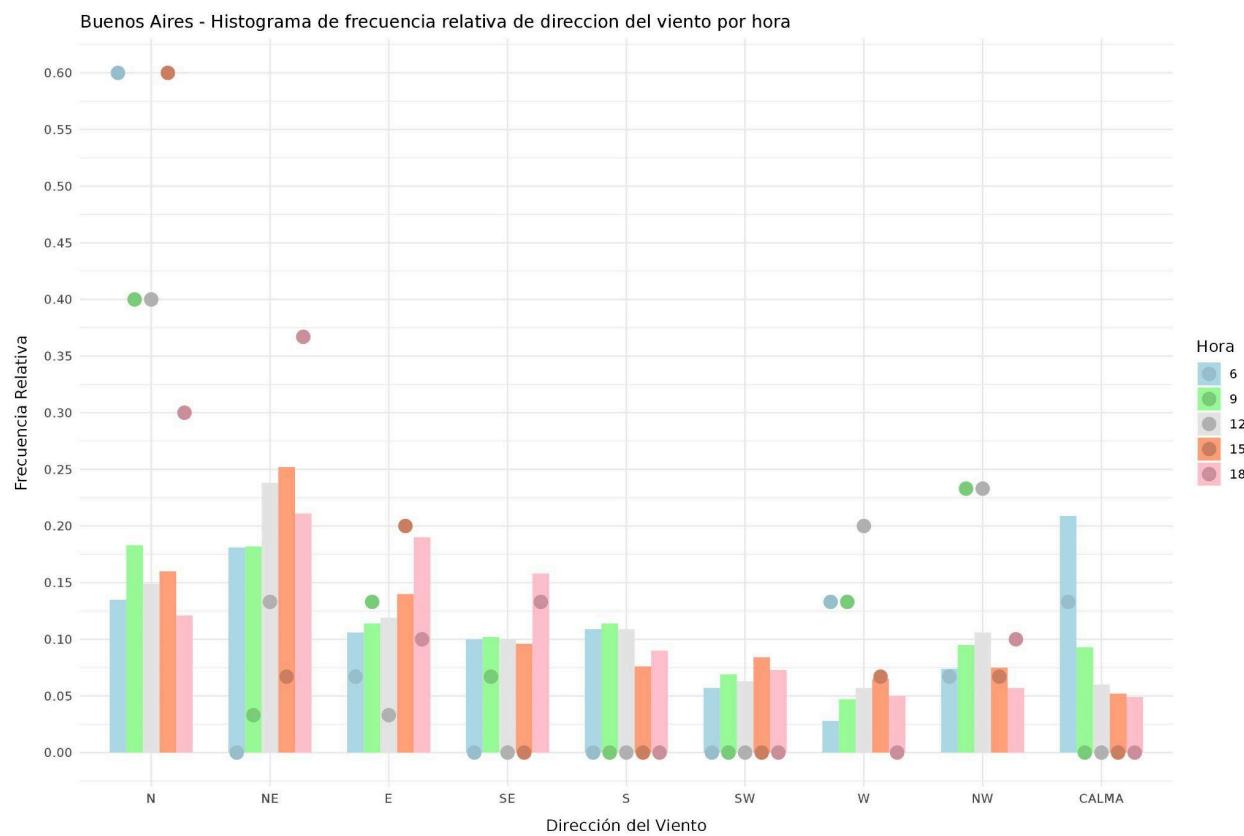


Figura 5.13 Histograma comparativo entre el período 2023 (puntos) y la climatología (barras) para las 06, 09, 12, 15 y 18 hora local en la ciudad de Buenos Aires.

5.3.2 Variación diaria del índice de estrés térmico UTCI

En la **Figura 5.14** se muestran los valores de UTCI calculados en las distintas horas para la ciudad de Buenos Aires para el período 28 de febrero - 14 de marzo de 2023. Allí pueden observarse situaciones de estrés térmico severo a partir del mediodía y muy severo hacia la tarde, con un valor máximo de UTCI de 44,6°C el día 11 de marzo a las

15 horas. En la hora 6 prevalece el nivel de estrés térmico “sin estrés”, aunque se encuentran 3 días con índice de estrés moderado (11, 12 y 14 de marzo) lo cual no es usual en la ciudad de Buenos Aires. Por otro lado, a las 9h, se observan situaciones de estrés “moderado” a “severo” en casi todo el periodo a excepción del 7 de marzo en donde no hubo estrés térmico.

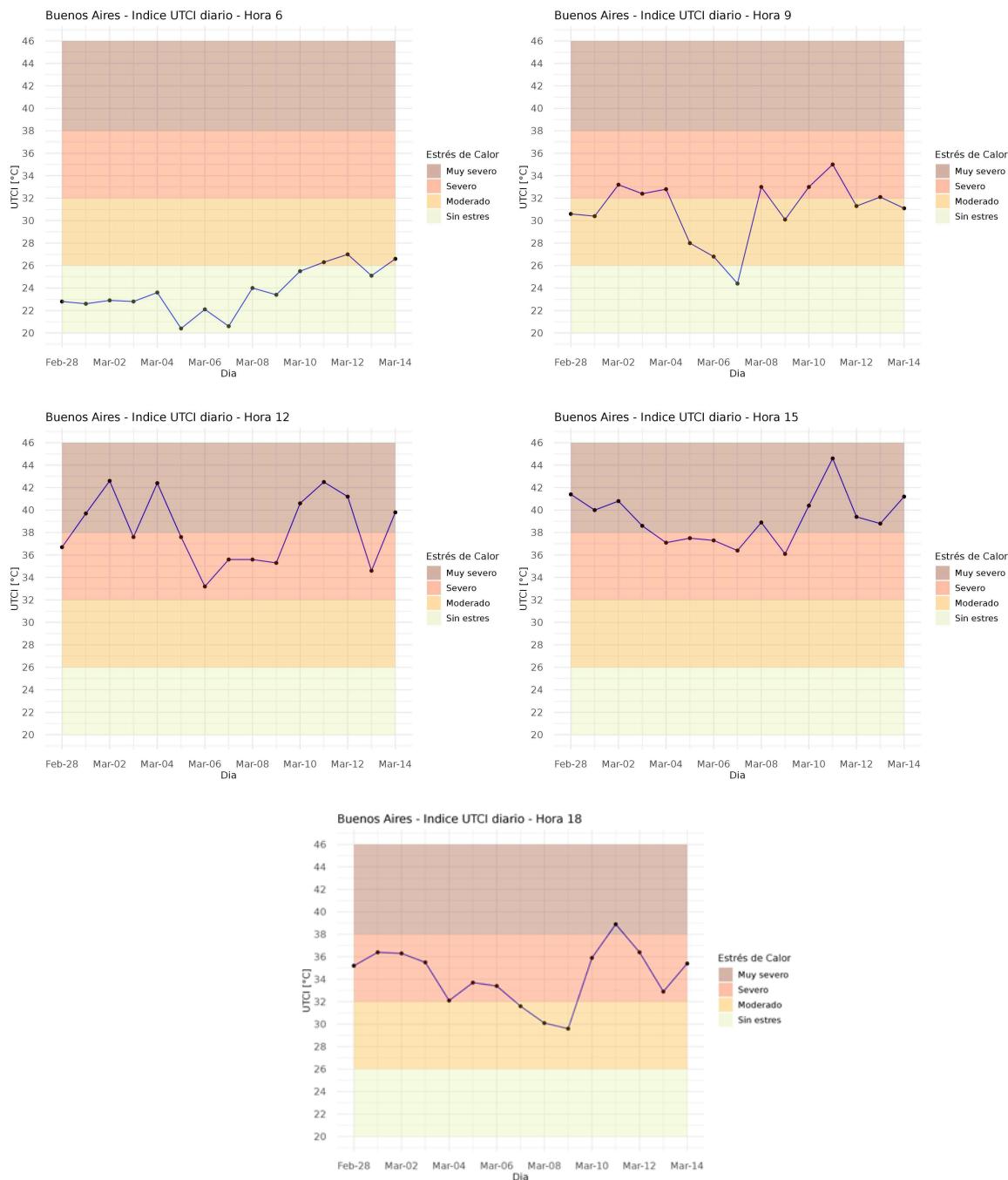


Figura 5.14 Índice UTCI para las horas 06, 09, 12, 15 y 18 hora local del periodo 28/02/2023 al 14/03/2023, en la ciudad de Buenos Aires.

5.3.3 Comparación entre la diferencia UTCI-Temperatura y las variables meteorológicas

En esta sección se muestran los valores diarios de la diferencia entre el índice UTCI y la temperatura durante la ola de calor del verano de 2023. Además, se detallan los valores de intensidad de viento, humedad relativa y nubosidad en las horas consideradas a fin de analizar en forma integral las condiciones de estrés térmico registradas durante el caso particular de estudio.

Durante todo el período considerado se observa que para la hora 6 la temperatura percibida fue menor que la temperatura ambiente, con una diferencia negativa máxima de $-3,8^{\circ}\text{C}$ para el día 6 de marzo (**Figura 5.15**). Ese día estuvo caracterizado por condiciones de viento intenso y sin nubosidad, especialmente durante la mañana. Los días con diferencias cercanas a 0 (temperatura observada y UTCI con valores similares) se dieron en días con menor intensidad del viento y humedad relativa por encima del 80%.

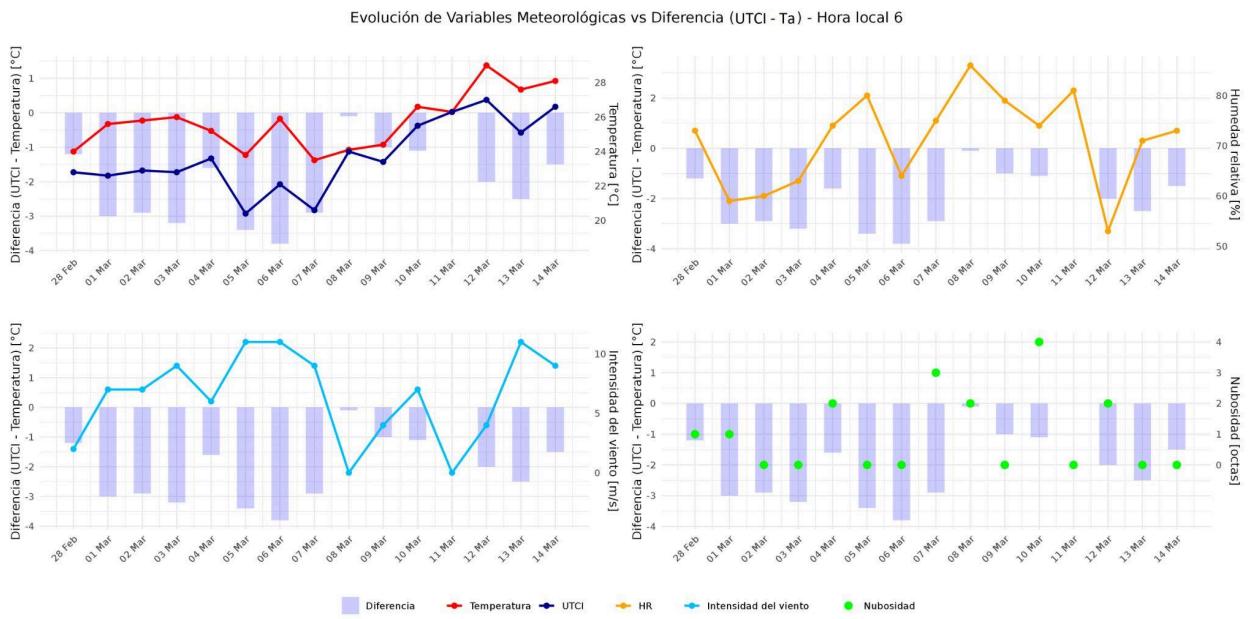


Figura 5.15 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 6h (local).

En todas las horas subsiguientes, el UTCI resultó superior a la temperatura observada. A las 9 horas (**Figura 5.16**) se observa una máxima diferencia de $5,9^{\circ}\text{C}$ el día 2 de marzo, que coincidió con un mínimo de intensidad del viento, condiciones de cielo despejado y humedad relativa por debajo del 50%. Por otro lado, la mínima diferencia se registró el día 6 de marzo, en coincidencia con los valores más altos de intensidad del viento, sin nubosidad y humedad relativa cercana al 65%.

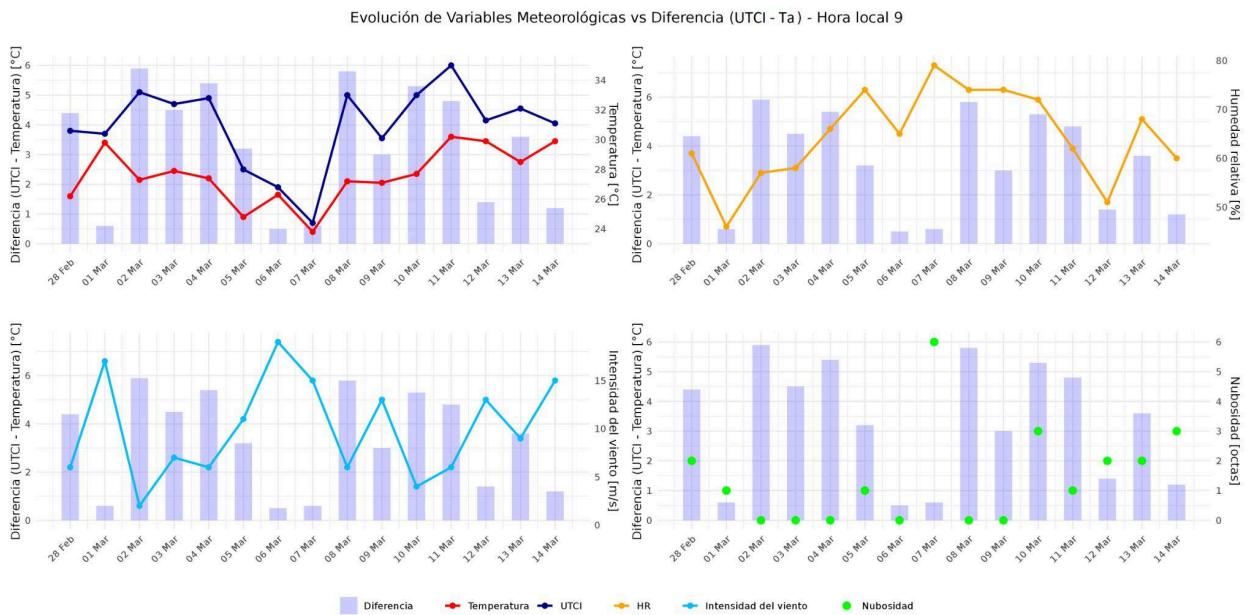


Figura 5.16 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 9h (local).

Para las 12h (**Figura 5.17**) se destaca una mayor diferencia entre temperatura e índice para el día 5 de marzo con un valor de 8,6°C y una mínima para el día siguiente de 3°C,. En este caso, en ambos días, la temperatura, humedad y nubosidad se mantienen en valores similares, pero la intensidad de viento no. El día 5 se registra el mínimo valor del período (2 m/s) y el día 6 se da la máxima intensidad (17 m/s).

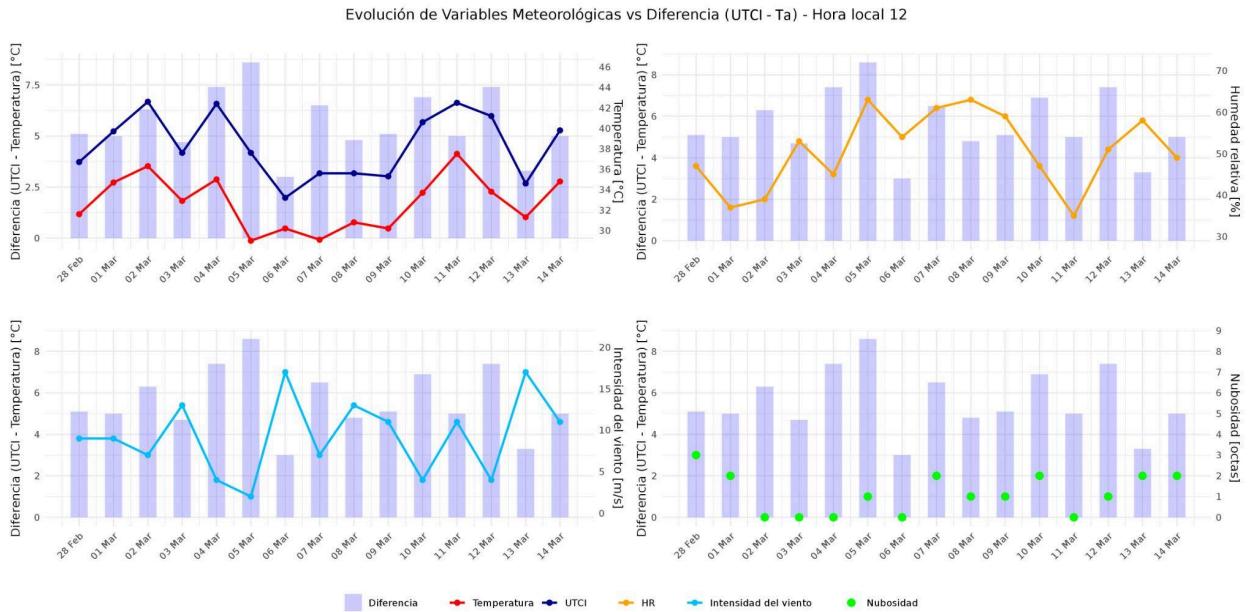


Figura 5.17 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 12h (local).

Para las 15h (**Figura 5.18**) se observa una máxima diferencia el día 4 de marzo con un valor de 7.1°C y una mínima el día 9 de marzo con 2.8°C . Entre ambos días se destaca la diferencia en la intensidad del viento (mínima durante el día 4 de marzo) y la humedad relativa en donde se dio un valor máximo por encima del 65% durante el 4 de marzo y de casi 40% el día 9 de marzo. Además, para el 1 de marzo se dió también un mínimo de la diferencia, coincidiendo con un mínimo de humedad relativa de casi 30% y un máximo de intensidad del viento de 20 m/s.

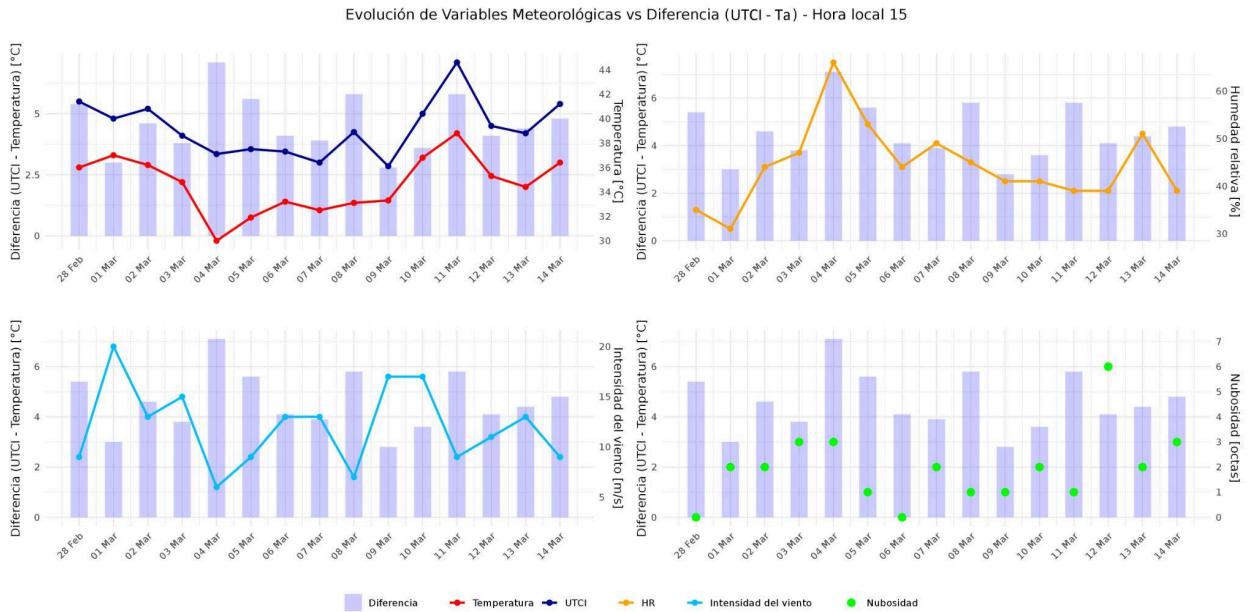


Figura 5.18 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 15h (local).

Por último, a las 18 horas (**Figura 5.19**), no se observan diferencias entre el índice y la temperatura ambiente similares a lo encontrado a las 9, 12 ó 15h ya que el valor máximo se encuentra en los 2,5°C. Por otro lado, se destacan los valores mínimos de la variable UTCI - Ta en los días 8, 9 y 13 de marzo donde las intensidades del viento fueron máximas, sobre todo el día 9 de marzo donde la diferencia fue incluso negativa.

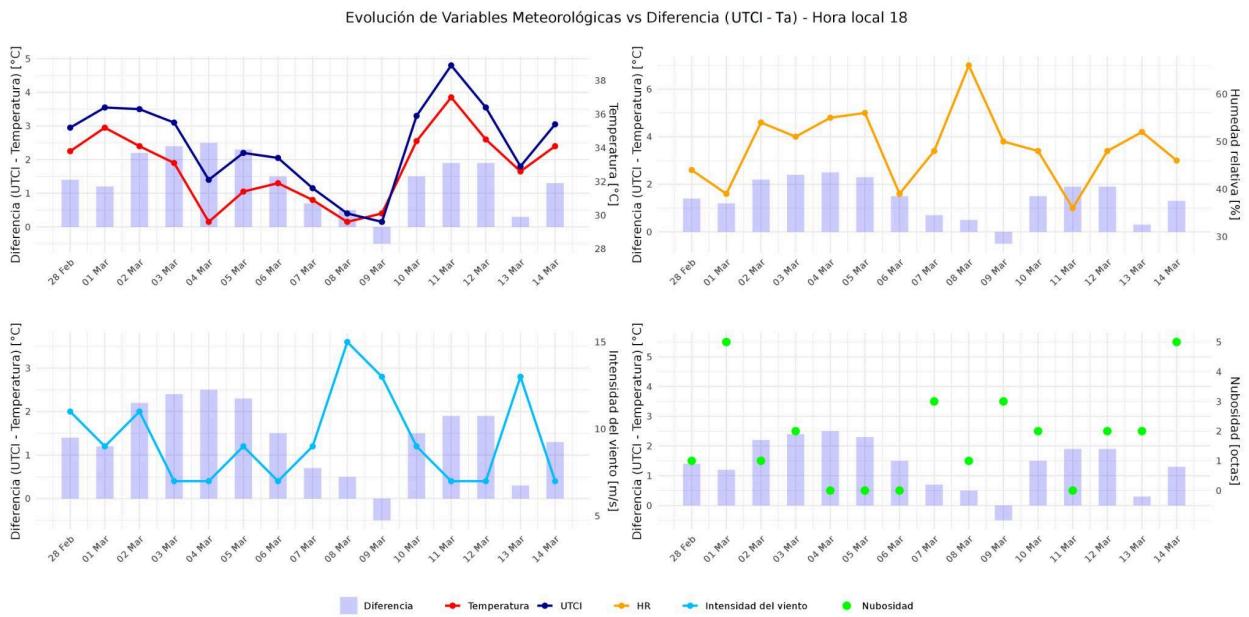


Figura 5.19 Evolución diaria UTCI-Ta vs variables a las 18h (local).

El análisis de este estudio de caso reflejó la importancia de la intensidad del viento en la percepción térmica representada a través del índice UTCI, coincidiendo con otros estudios que se encuentran en la literatura, como Frohlich et al. (2015).

6. Conclusión

Los flujos radiativos de onda corta y onda larga, a los que está expuesto el cuerpo humano, influyen en la respuesta fisiológica del mismo y en el intercambio de flujos de calor sensible y latente entre el cuerpo y el medio ambiente. Los índices de estrés térmico resumen estas condiciones en un indicador simple, lo que resulta en una herramienta de mucha utilidad para el análisis del confort térmico de las personas. El índice UTCI en particular, resume el efecto de la temperatura ambiental, la velocidad del viento, la humedad, y los flujos radiativos de onda larga y onda corta sobre el cuerpo humano y tiene la ventaja de que puede ser utilizado en distintos tipos de climas.

En esta tesis se analizó el índice de estrés térmico UTCI de los meses de verano (diciembre-enero-febrero) en las tres ciudades de mayor población de Argentina: Buenos Aires, Córdoba y Rosario. Se analizaron 5 horas del día (6, 9, 12, 15 y 18 hora local) durante un periodo de 40 años (1981-2020).

Se realizó una estadística básica del índice y un análisis de variabilidad temporal, considerando en particular las condiciones de estrés severo. Teniendo en cuenta que el índice considera solamente la intensidad del viento, se estudió complementariamente las direcciones de viento predominantes en estos casos. Finalmente se analizó un caso de estudio correspondiente al periodo de 28 de febrero al 14 de marzo de 2023, caracterizado como un periodo excesivamente cálido con 15 días consecutivos con temperaturas máximas por encima del percentil 90 del semestre cálido octubre-marzo en la ciudad de Buenos Aires.

Comparando las 4 décadas analizadas, y analizando las distintas horas de interés, se destaca mayor probabilidad de situaciones de estrés severo a las 15 horas en la ciudad de Córdoba y entre las 12 y 15 horas en Buenos Aires y Rosario. En la última década, aproximadamente el 50% de los días de verano registraron condiciones de estrés severo a las 15 hs en las tres ciudades analizadas, porcentaje que fue aún mayor en Rosario y en Buenos Aires.

Al analizar la variabilidad interanual se observó que las anomalías del índice UTCI tuvieron una tendencia negativa para las 6h en la ciudad de Córdoba y una alternancia

entre valores positivos y negativos en todo el periodo y el resto de las horas. Con respecto a Buenos Aires y Rosario se evidenciaron tendencias positivas y significativas en todas las horas analizadas, destacándose en Buenos Aires la aparición de anomalías positivas consecutivas (o muy cercanas a cero en algún año y horario particular) a partir del año 2006.

Si bien es esperable que los cambios en la temperatura del aire determinen cambios en la percepción térmica, este trabajo mostró que la tasa de cambio en cada variable es diferente. En la ciudad de Buenos Aires, por ejemplo, la diferencia entre el estrés térmico humano y la temperatura del aire marcó una tendencia al aumento a lo largo de los años en todas las horas analizadas. A las 6h, las diferencias son negativas pero con tendencia positiva, lo que implica que la percepción térmica se está acercando a la temperatura del aire. En el resto de las horas, las diferencias son positivas, con tendencia positiva, lo que implica un valor de UTCI que se fue alejando cada vez más del valor de la temperatura del aire. Lo mismo se observó en la ciudad de Rosario, a excepción de las 9h que no registró una tendencia significativa. La ciudad de Córdoba mostró un comportamiento opuesto con tendencias negativas y significativas a las 6, 9 y 12h. A la hora 6, donde se registran diferencias negativas con tendencia negativa, esto implica que el UTCI se está “alejando” del valor de temperatura del aire, resultando en una percepción de menor temperatura. En el resto de las horas, donde el UTCI es mayor que la temperatura del aire, se observa que estas diferencias se están acortando. Más allá de estas diferencias, hay una característica que debe destacarse y que se observa en las tres localidades: el cambio significativo de percepción térmica entre las 6 y las 9 hs, que es mucho mayor al cambio de temperatura que de por sí se registra entre estas horas. En otras palabras, el cuerpo experimenta un cambio de temperatura entre las 6h y las 9h mucho mayor que el cambio de temperatura del aire.

El análisis de frecuencia de días de verano con estrés severo arrojó resultados diferentes para las tres ciudades analizadas. La ciudad de Córdoba no presentó tendencias positivas o negativas significativas en ninguna de las horas analizadas. En Buenos Aires se encontró tendencia positiva significativa en las horas 09, 12, 15 y 18, mientras que en la ciudad de Rosario se dieron a las 12h y 15h. Estos resultados son consistentes con lo encontrado por Miranda et al. (2024), quienes analizaron las

anomalías anuales del número de horas con UTCI >32 en el periodo 1979-2020 en grandes ciudades de Sudamérica utilizando datos de reanálisis de la base ERA5-HEAT, y reportaron un aumento significativo en Buenos Aires y Rosario.

Los patrones de circulación del viento pueden ser grandes determinantes de la sensación térmica, ya que su dirección puede influir en las características térmicas y de humedad del ambiente, y su intensidad influye en los procesos de mezcla del aire y en los intercambios de calor entre el cuerpo y el ambiente. La intensidad de viento es tenida en cuenta en el cálculo del índice UTCI, no así su dirección. En esta tesis, se analizaron los patrones de circulación de viento asociados con situaciones de estrés severo en las tres ciudades investigadas. El análisis evidenció mayores frecuencias de dirección de viento del sector norte y noreste y menores del sector sur en comparación con la climatología, registrándose un 50% menos de frecuencia de componente sur bajo condiciones de estrés severo en relación a la climatología. Al analizar en particular la variabilidad de la frecuencia de la componente sur se observan cambios consistentes físicamente con lo observado con el índice UTCI. En la ciudad de Córdoba se obtuvieron tendencias positivas significativas a las 6 y 9h, congruentes con una disminución del índice UTCI que no se observa en las otras localidades. Para Buenos Aires, en cambio, las series presentan tendencias negativas y significativas a las 9h, 15h y 18h, localidad en la que se registran los mayores aumentos del UTCI. Por último, en la ciudad de Rosario, se encontró tendencia positiva y significativa a las 6 horas, horario en el que no se registran condiciones de estrés severo. Se requeriría explorar otros posibles factores que afectan los cambios del UTCI observados en la localidad.

La última parte de este trabajo estuvo dedicada al análisis del UTCI y la circulación atmosférica asociada a un período excesivamente cálido ocurrido en la ciudad de Buenos Aires, entre el 28 de febrero y el 14 de marzo de 2023. Este periodo estuvo caracterizado por una situación de bloqueo que impidió el ingreso de aire más frío y seco a la ciudad de Buenos Aires. En el análisis diario del índice UTCI se encontraron situaciones de mayor estrés severo a las 12h y 15h con valores en general por encima de los 38°C. Particularmente, en los días 2, 4 y 11 de marzo se encontraron valores de UTCI mayores a 42°C. Por otro lado, en el horario de las 6 de la mañana, no se encontraron valores que correspondan a estrés severo, pero se registraron tres días

con estrés moderado. Este resultado, teniendo en cuenta el análisis climatológico del índice en Buenos Aires, no es un valor común para este horario. Otro resultado no común del UTCI fue el registro de 7 días con más de 32°C a las 9h. Las frecuencias relativas de dirección de viento predominaron del sector norte en cada una de las horas, duplicando o triplicando la frecuencia esperada por climatología. También se observó una mayor frecuencia de viento de componente noroeste y una cantidad escasa o nula de calmas, dependiendo de la hora considerada. Por otra parte, no se registraron frecuencias del sur o sudoeste, solo del sudeste en alguna de las horas estudiadas.

La diferencia UTCI-temperatura del aire registradas durante este período extremadamente cálido fue contrastado con las variables utilizadas en el cálculo del índice UTCI, evidenciándose una mayor sensibilidad ante cambios en la intensidad del viento. Ante una menor intensidad del viento la temperatura percibida fue mayor que la temperatura del aire, mientras que en situaciones de mayor intensidad del viento la temperatura percibida fue menor o similar a la temperatura del aire. Estudios previos demuestran que el UTCI posee una gran sensibilidad frente a los cambios en la intensidad del viento, incluso más que otros índices como PT, PET y WC (Frölich y Matzarakis, 2015; Provençal et al., 2016).

Este trabajo constituye un aporte al conocimiento del estrés térmico de verano de las tres ciudades más populosas de Argentina, así como su variabilidad en los últimos 40 años. En particular, esta tesis pone en evidencia la importancia de realizar estudios vinculados a índices de estrés térmico, como el UTCI, teniendo en cuenta especialmente que éstos no tienen la misma variabilidad que la temperatura en sí misma, cuyo estudio es mucho más rico y diverso en la literatura científica. Conocer las condiciones de estrés térmico es de suma importancia para la toma de decisiones vinculadas con la salud pública, el estrés laboral y la planificación urbana, entre muchos otros aspectos. Se espera con esta tesis haber contribuido en esta temática.

Bibliografía

Alessandro, A. P., & De Garín, A. B. (2003). A study on predictability of human physiological strain in Buenos Aires City. *Meteorological Applications*, 10(3), 263-271.
<https://doi.org/10.1017/s1350482703003062>

Almeira, G., Rusticucci, M., & Suaya, M. (2016). Relación entre mortalidad y temperaturas extremas en Buenos Aires y Rosario. *Meteorológica*, 41(2), 65-79

Baruti, M. M., Johansson, E., & Åstrand, J. (2019). Review of studies on outdoor thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric. *International Journal Of Biometeorology*, 63(10), 1449-1462. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01757-3>

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5-10. <https://doi.org/10.7163/gpol.2013.1>

Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2011). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal Of Biometeorology*, 56(3), 515-535.
<https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. T. (2010). Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscelanea Geographica/Miscellanea Geographica*, 14(1), 91-102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>

Bröde, P., Błażejczyk, K., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kuklane, K., & Kampmann, B. (2013a). The Universal Thermal Climate Index UTCI Compared to Ergonomics Standards for Assessing the Thermal Environment. *Industrial Health/Industrial Health*, 51(1), 16-24. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0098>

Bröde, P., Krüger, E. L., & Fiala, D. (2013b). UTCI: validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. *Geographia Polonica*, 86(1), 11-20.
<https://doi.org/10.7163/gpol.2013.2>

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2011). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal Of Biometeorology*, 56(3), 481-494.
<https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

Campetella, C. M., & Rusticucci, M. (1998). Synoptic analysis of an extreme heat wave over Argentina in March 1980. *Meteorological Applications*, 5(3), 217-226.
<https://doi.org/10.1017/s1350482798000851>

Desai, M., & Dhorde, A. (2017). Trends in thermal discomfort indices over western coastal cities of India. *Theoretical And Applied Climatology*, 131(3-4), 1305-1321.
<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2042-8>

Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H., & Pappenberger, F. (2020). ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 2-10. <https://doi.org/10.1002/gdj3.102>

Di Napoli, C., Pappenberger, F., & Cloke, H. (2018). Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal Of Biometeorology*, 62(7), 1155-1165. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>

Diniz, F. R., Iwabe, C. M. N., & Piacenti-Silva, M. (2018). Valuation of the human thermal discomfort index for the five Brazilian regions in the period of El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *International Journal Of Biometeorology*, 63(11), 1507-1516.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1622-3>

Doğan, M., Vural, E., & Avci, T. (2020). Determination of Comfort Areas According to the Wind Chill Index of the Central Anatolia Region. *DergiPark* (Istanbul University).
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/kastamonujes/issue/58573/824493>

Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., De Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Jay, O. (2021). Hot weather and heat extremes: health risks. *Lancet*, 398(10301), 698-708.
[https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)01208-3)

Eludoyin, O. M., Adelekan, I., Webster, R., & Eludoyin, A. O. (2013). Air temperature, relative humidity, climate regionalization and thermal comfort of Nigeria. *International Journal Of Climatology*, 34(6), 2000-2018. <https://doi.org/10.1002/joc.3817>

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2011). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal Of Biometeorology*, 56(3), 429-441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>

Founda, D., Pierros, F., Katavoutas, G., & Keramitsoglou, I. (2019). Observed Trends in Thermal Stress at European Cities with Different Background Climates. *Atmosphere*, 10(8), 436.
<https://doi.org/10.3390/atmos10080436>

Fröhlich, D., & Matzarakis, A. (2015). A quantitative sensitivity analysis on the behavior of common thermal indices under hot and windy conditions in Doha, Qatar. *Theoretical And Applied Climatology*, 124(1-2), 179-187. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1410-5>

Glenn R. McGregor, Jennifer K. Vanos, (2018). Heat: a primer for public health researchers, *Public Health*, Volume 161,2018, Pages 138-146, ISSN 0033-3506.
<https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.11.005>

Havenith, G., & Fiala, D. (2011a). Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive physiology*, 6(1), 255-302. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140051>

Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richards, M. H., Bröde, P., Holmér, I., Rintamäki, H., Benshabat, Y., & Jendritzky, G. (2011b). The UTCI-clothing model. *International Journal Of Biometeorology*, 56(3), 461-470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>

Herrera, N., M.M. Skansi, M.A. Berón, C. Campetella, A. Cejas, J. Chasco, F. Chesini, E. de Titto, M. Gatto, M. Saucedo y M. Suaya, 2018: Sistema de Alerta Temprana por Olas de Calor y Salud (SAT-OCS). Nota Técnica SMN 2018-50

Huang, Y., Zhang, X., Zhang, D., Zhang, L., Zhang, W., Ren, C., Pan, T., Chen, Z., & Chen, Y. (2021). Spatial-Temporal Characteristics of Arctic Summer Climate Comfort Level in the Context of Regional Tourism Resources from 1979 to 2019. *Sustainability*, 13(23), 13056. <https://doi.org/10.3390/su132313056>

Jendritzky, G., De Dear, R., & Havenith, G. (2011). UTCI—Why another thermal index? *International Journal Of Biometeorology*, 56(3), 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>

Kephart, J. L., Sánchez, B. N., Moore, J. L., Schinasi, L. H., Bakhtsiyarava, M., Ju, Y., Gouveia, N., Caiaffa, W. T., Dronova, I., Arunachalam, S., Roux, A. V. D., & Rodríguez, D. A. (2022). City-level impact of extreme temperatures and mortality in Latin America. *Nature Medicine*, 28(8), 1700-1705. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-01872-6>

Kovats, S., & Hajat, S. (2008). Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annual Review Of Public Health*, 29(1), 41-55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>

Matzarakis, A., Muthers, S., & Rutz, F. (2015). Application and comparison of UTCI and PET in temperate climate conditions. *Finisterra*, 49(98). <https://doi.org/10.18055/finis6453>

Miller, V. S., & Bates, G. (2007). The Thermal Work Limit Is a Simple Reliable Heat Index for the Protection of Workers in Thermally Stressful Environments. *Annals Of Occupational Hygiene*. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem035>

Miranda, V.F.V.V., dos Santos, D.M., Peres, L.F. et al. (2024). Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis. *Theor Appl Climatol* 155, 911–928 . <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04668-x>

Monforte, P., & Ragusa, M. A. (2022). Evaluation of Bioclimatic Discomfort Trend in a Central Area of the Mediterranean Sea. *Climate*, 10(10), 146. <https://doi.org/10.3390/cli10100146>

Servicio Meteorológico Nacional, (2023a). Informe especial N°9 por Ola de Calor (28 de febrero al 7 de marzo de 2023). Disponible en:

<https://www.smn.gob.ar/boletines/informe-especial-n%C2%B09-por-ola-de-calor-28-feb-al-7-mar-2023>

Servicio Meteorológico Nacional, (2023b). Informe especial N°10 por Ola de Calor (8 al 19 de marzo de 2023). Disponible en:

<https://www.smn.gob.ar/boletines/informe-especial-n%C2%B010-por-ola-de-calor-8-al-19-de-marzo-de-2023>

Provençal, S., Bergeron, O., Leduc, R., & Barrette, N. (2016). Thermal comfort in Quebec City, Canada: sensitivity analysis of the UTCI and other popular thermal comfort indices in a mid-latitude continental city. *International journal of biometeorology*, 60, 591-603.

Rusticucci, M., Kysely, J., Almeira, G., & Lhotka, O. (2015). Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical And Applied Climatology*, 124(3-4), 679-689.

<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1445-7>

Yamamoto, R., Iwashima, T. y Sange, N. K.(1986) , An analysis of climatic jump, *J. Met. Soc. of Japan*, 64, 273-281 https://doi.org/10.2151/jmsj1965.64.2_273

Zhang, Y., Xiao, F., Mei, H., Li, Y., Liu, C., & Qiu, X. (2022). Comprehensive analysis of climate-related comfort in southern China: Climatology, trend, and interannual variations. *Urban Climate*, 46, 101349. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101349>