

LA CIRCULACIÓN DE HADLEY AL SUDOESTE DE AMÉRICA DEL SUR: MÉTRICAS PARA SU CARACTERIZACIÓN

Elizabeth Beatriz Naranjo Tamayo¹, Juan Antonio Rivera¹, Maximiliano Viale¹, Ricardo Villalba¹

¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA,
CONICET-Mendoza)

(Manuscrito recibido el 8 de junio de 2023, en su versión final el 26 de diciembre de 2023)

RESUMEN

Este trabajo proporciona una evaluación de las métricas más utilizadas para caracterizar la rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los últimos 40 años sobre la región del sudoeste de América del Sur, a través del análisis de siete métricas hemisféricas y tres regionales obtenidas a partir de variables meteorológicas pertenecientes al reanálisis ERA5 para el período 1979-2021. Las relaciones entre las métricas fueron determinadas a partir del coeficiente de correlación de Pearson y las tendencias decadales a partir del test de Mann-Kendall. Los resultados encontrados sugieren relaciones estadísticamente significativas entre la métrica hemisférica de referencia función corriente del flujo de masa en 500 hPa, la métrica regional vinculada a la posición latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sur y las métricas de la troposfera baja relacionadas con el máximo de la presión a nivel del mar y la latitud donde cambia de signo el viento en superficie tanto en la escala anual como estacional. Las métricas vinculadas al jet polar impulsado por las perturbaciones y a la precipitación menos la evaporación regional capturan la variabilidad de la posición latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sur, mientras que la métrica hemisférica de la troposfera baja precipitación menos evaporación captura la variabilidad de la métrica de referencia. En cuanto a las tendencias por década de los promedios anuales de la rama de descenso de la Celda de Hadley durante los últimos 40 años se encontraron tendencias negativas estadísticamente significativas, lo cual indica una expansión de la Celda de Hadley durante las últimas cuatro décadas. Esto podría explicar en cierta medida las tendencias decrecientes de la precipitación en la región del sudoeste de América del Sur.

Palabras clave: métricas, tendencias, ERA5, circulación de Hadley, sudoeste de Sudamérica.

THE HADLEY CIRCULATION IN SOUTHWESTERN SOUTH AMERICA: METRICS FOR ITS CHARACTERIZATION

ABSTRACT

This paper provides an evaluation of the most commonly used metrics to characterize the downward branch of the Hadley cell and its trends over the last 40 years over the southwestern region of South America, through the analysis of

seven hemispheric and three regional metrics obtained from meteorological variables associated to the ERA5 reanalysis for the period 1979-2021. Relationships between metrics were determined from Pearson's correlation coefficient and decadal trends from the Mann-Kendall test. The results found suggest statistically significant relationships between the hemispheric metric of reference mass flux current function at 500 hPa, the regional metric linked to the latitudinal position of the South Pacific Anticyclone, and the lower tropospheric metrics related to the maximum of sea level pressure and the latitude where the surface wind changes sign on both annual and seasonal scales. The metrics linked to eddy driven jet and regional precipitation minus evaporation capture the variability of the latitudinal position of the South Pacific Anticyclone, while the hemispheric lower troposphere metric precipitation minus evaporation captures the variability of the reference metric. Regarding the trends by decade of the annual averages of downward branch of the Hadley Cell over the last 40 years, statistically significant negative trends were found, indicating an expansion of the Hadley Cell over the last four decades. This could explain to some extent the decreasing precipitation trends in the southwestern region of South America.

Keywords: metrics, trends, ERA5, Hadley circulations, southwestern South America.

1. INTRODUCCIÓN

La rama de descenso de la circulación de Hadley ejerce una notable influencia sobre el clima de latitudes subtropicales y medias. La subsidencia generada en la rama descendente seca la atmósfera e inhibe la formación de nubes y precipitación, lo cual propicia que aproximadamente en los 30° N y 30° S se encuentren los mayores desiertos del mundo. Por lo tanto, cualquier cambio en la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación de Hadley puede producir una serie de impactos en el clima de las regiones subtropicales del planeta (Birner et al., 2014; Xian et al., 2021).

Ante el aumento de los gases de efecto invernadero y la disminución del ozono estratosférico se han observado cambios en la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación de Hadley (Staten et al., 2020). Dicha circulación presenta una tendencia de expansión hacia los polos desde aproximadamente la década de 1980 (IPCC,

2021). De acuerdo a un estudio reciente, las tasas de expansión oscilan entre 0.25° y 0.5° de latitud por década dependiendo de las bases de datos observacionales, los modelos climáticos y las métricas usadas (Staten et al., 2020). Estas variaciones son una evidencia de las incertidumbres asociadas a su cuantificación (Birner, 2010; Davis y Rosenlof, 2012, Waugh et al., 2018; Xian et al., 2021).

En este contexto, diversas métricas a escala hemisférica y regional fueron generadas para determinar la posición latitudinal de la rama de descenso de dicha circulación. A escala hemisférica, existen distintas clasificaciones. Por ejemplo, Lucas et al., (2014) clasifican las métricas a partir de métodos basados en la tropopausa, la función corriente de flujo de masa, el jet subtropical y empleando bases de datos satelitales y de superficie. Por su lado, Staten et al., (2018) las clasifican como métricas de la troposfera alta, media y baja. Por último, Xian et al., (2021) clasifican las métricas en dinámicas, hidrológicas, térmicas y químicas.

Existen dos métricas en particular que son utilizadas con frecuencia para identificar la Celda de Hadley a escala hemisférica: la función corriente del flujo de masa (ψ) y la función corriente de flujo de masa en 500 hPa (ψ_{500hPa}). La métrica ψ representa al comportamiento dinámico de la circulación de Hadley, mientras que la métrica de la troposfera media ψ_{500hPa} representa la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación de Hadley. Esta última métrica es considerada de referencia en los estudios vinculados a la expansión de la Celda de Hadley (Solomon et al., 2016; Staten et al., 2018). Según la clasificación de Staten et al. (2018), dentro de las métricas de la troposfera alta se encuentran las basadas en el comportamiento de la tropopausa (TPB), en la corriente en chorro subtropical (STJ) y en la radiación de onda larga saliente (OLR). Por su parte, dentro de las métricas de la troposfera baja se encuentran el viento zonal en superficie (UAS), el máximo de presión a nivel del mar (SLP), y las métricas vinculadas al ciclo hidrológico (la diferencia entre la precipitación y la evaporación, P-E) y al jet impulsado por las perturbaciones (EDJ). Un ejemplo de la identificación de la rama de descenso de la circulación de Hadley a partir de estas métricas se muestra en la Figura 1.

En los estudios vinculados a examinar la covariabilidad entre las diferentes métricas de expansión de la circulación de Hadley a partir de modelos climáticos y reanálisis meteorológicos se observa que las métricas de la troposfera baja SLP, UAS y P-E se corresponden con la variabilidad de la métrica de la troposfera media ψ_{500hPa} (Solomon et al., 2016; Davis y Birner, 2017; Waugh et al., 2018; Staten et al., 2018). Asimismo, la métrica EDJ se encuentra estrechamente relacionada en la escala interanual y estacional con la métrica ψ_{500hPa} (Waugh et al., 2018). Por el contrario, las métricas de la troposfera alta OLR, TPB y STJ generalmente no presentan correlación con la métrica ψ_{500hPa} (Waugh et al., 2018; Staten et al., 2020); pero sí presentan correlación moderada entre ellas.

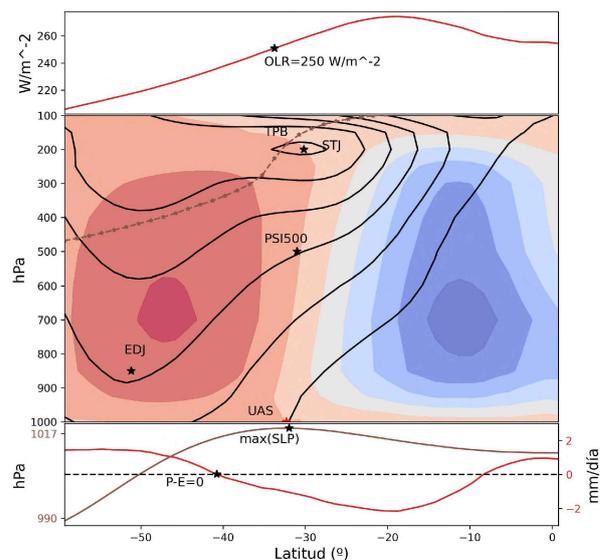


Figura 1: Representación esquemática de diferentes aspectos de la circulación de Hadley. Panel superior: en línea roja se observa la radiación de onda larga saliente (OLR), la estrella representa donde $OLR=250Wm^{-2}$. En el panel central se representa a la Celda de Hadley en azul; Celda de Ferrel en rojo, altura de la tropopausa (TPB) (línea punteada en marrón), Corriente en chorro subtropical (STJ, representada por el máximo del viento medio zonal en contornos negros y asterisco), ψ_{500hPa} (PSI500 representa la posición de la rama de descenso de la Celda de Hadley), el flujo de remolinos turbulentos (eddy driven jet (EDJ)) representada con estrella negra, donde cambia de signo el viento en superficie (UAS) representada con una estrella roja. En el panel inferior se observa el máximo de la presión a nivel del mar (SLP) con una estrella negra sobre la línea marrón y donde la precipitación menos la evaporación es igual a cero (P-E, estrella en línea roja). Adaptado de Waugh et al., (2018) para el Hemisferio Sur.

En la escala regional, la expansión de la Celda de Hadley ha sido explorada por una cantidad limitada de estudios. El cómputo

de índices regionales vinculados a la rama descendente de la Celda de Hadley supone un desafío (Staten et al., 2020). La circulación de Hadley históricamente se ha calculado desde una perspectiva hemisférica para conservar el flujo de masa en la dirección zonal (Nguyen et al., 2017). Esto hace que no se tenga en cuenta los cambios en la circulación de Hadley asociados a la irregular distribución de mares y continentes. Las regiones con mayor cantidad de estudios vinculados a la Celda de Hadley son las regiones de África (Manney y Hegglin, 2018), este de Asia, Australia y el oeste del Océano Pacífico (Choi et al., 2014; Lucas y Nguyen, 2015), y la región de América del Sur. Entre ellos se destacan los estudios de Souza y Ambrizzi, (2002), Chen et al., (2014), Freitas y Ambrizzi, (2015), Saurral et al. (2017), Díaz y Vera, (2018), Vera et al., (2019), y Villamayor et al., (2021).

Estudios a escala regional usan las métricas hemisféricas adaptadas para la región de interés, tales como ψ_{500hPa} (Staten et al., 2019; Villamayor et al., 2021), SLP (Staten et al., 2019) y OLR (Chen et al., 2014). El uso regional de las métricas regionales antes mencionadas no implica expansión de la Celda de Hadley en todas las longitudes (Staten et al., 2020). Algunos autores han regionalizado las métricas hemisféricas antes mencionadas a partir de un promedio zonal sobre regiones específicas. Por ejemplo, la métrica ψ (70° W- 50° W (Saurral et al., 2017); y 110° W- 50° W (Vera et al., 2019)); y la métrica OLR sobre América del Sur (80° W - 35° W; Freitas y Ambrizzi, 2015). Por otro lado, Nguyen et al., (2017) a partir de una adaptación de la aproximación realizada por Schwendike et al., (2014) utilizaron a la variable viento divergente para calcular a la Celda de Hadley regional, mientras que Barrett y Hameed, (2016), Flores-Aqueveque et al., (2020) y Reboita et al., (2019) utilizaron los índices intensidad y posición del anticiclón subtropical. Además, Flores-Aqueveque et al., (2020) empleó la métrica vinculada a la posición del jet subtropical para calcular las variaciones regionales en la Celda de Hadley.

Como se puede observar, existen variedades de métricas a escala hemisférica y regional para determinar la posición de la rama de descenso de la Celda de Hadley. No obstante, ¿cuáles son las métricas más consistentes para la región del sudoeste de América del Sur (SWSA), ubicada entre los 25° - 47° S y 65° - 75° W, y cómo ha sido el comportamiento de la Celda de Hadley en los últimos 40 años? Este es un punto de mayor interés. La región SWSA ha presentado una tendencia decreciente de gran magnitud en la precipitación regional desde la década de 1980, parcialmente atribuida al cambio climático antropogénico (Vera y Díaz, 2015; Boisier et al, 2016; 2018; Garreaud et al., 2020). El mecanismo físico detrás de estas tendencias pudiera estar asociado a cambios en la circulación de Hadley (Lucas et al., 2014; Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2020; Morales et al., 2020).

Atendiendo a lo antes mencionado, en este trabajo se evalúan métricas vinculadas a la rama de descenso de la Celda de Hadley para determinar cuáles son las más consistentes sobre la región del SWSA y sus tendencias en los últimos 40 años. Este trabajo está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se detallan los datos, metodologías y período analizado. En la Sección 3 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis y comparación de las métricas. En la Sección 4 se realiza la discusión de los principales resultados de este trabajo. Finalmente, en la Sección 5 se plantean las conclusiones del trabajo.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

Para la evaluación se consideraron siete métricas hemisféricas y tres regionales. Cada una de ellas contempla diferentes aspectos de la circulación de Hadley (ver Tabla I). Dentro de las métricas hemisféricas observadas en la Tabla I, se encuentran: a) ψ_{500hPa} , es la latitud donde la función corriente de flujo de masa en 500 hpa es igual a cero. Esta métrica representa la posición latitudinal del borde de la Celda de Hadley hacia el polo sur; b) la latitud del máximo de SLP;

c) la latitud subtropical donde el viento zonal medio en superficie cambia de signo (vientos tropicales del este a vientos de latitud media del oeste, UAS); d) la latitud donde P-E es igual a cero; e) la latitud del máximo del viento zonal medio en 850 hPa (EDJ); f) la latitud del máximo promedio vertical del viento zonal entre los niveles de 100 y 400 hPa en la banda de latitud 15–70° (STJ); y g) la latitud en la que la OLR media zonal es igual a $250Wm^{-2}$. Dentro de las métricas regionales se encuentran la posición latitudinal del máximo de presión a nivel del mar del Anticiclón del Pacífico Sur (STRP) calculada en la banda latitudinal 10° S - 46° S y longitudinal 180° W - 70° W; la latitud en que la función corriente del flujo de masa en 500 hPa se hace cero (PSLR) y la latitud donde P-E es igual a cero (PER) se calcularon en la banda latitudinal 10° S - 60° S y longitudinal 110° W - 50° W. Las bandas latitudinales y longitudinales utilizadas para el cálculo de las métricas regionales se muestran en la Figura A2. La métrica ψ_{500hPa} se considera como referencia para analizar la relación con las métricas hemisféricas y regionales.

Las métricas hemisféricas fueron calculadas a partir de un promedio zonal en todas las longitudes y del paquete Tropical Width Diagnostics (PyTropD), desarrollado en Python (Adam et al., 2018) para el período 1979-2021. Las variables atmosféricas utilizadas en este trabajo se obtuvieron del reanálisis ERA5 del European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) (Hersbach et al., 2020), con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° (Tabla I). Este reanálisis captura la variabilidad de baja frecuencia del sistema climático mucho mejor que reanálisis previos como el ERA-Interim (Zaplotnik et al., 2022) y reduce el sesgo de la divergencia del viento zonal y meridional sobre los océanos (Rivas y Stoffelen, 2019). Esta última ventaja es de gran importancia para la identificación de la circulación de Hadley.

Por otro lado, las series de la posición latitudinal media anual de la circulación de Hadley obtenidas fueron desestacionalizadas previo al

cálculo de las correlaciones como en Davis y Birnes, (2016). La desestacionalización se realizó a partir de remover la media estacional climatológica (1979-2021) de cada uno de los valores medios estacionales de cada año. Los valores de las correlaciones de Pearson anuales y estacionales (verano, DEF; otoño, MAM; invierno, JJA y primavera, SON) significativas estadísticamente se obtuvieron a partir del test Normal.

Además, se realizó una caracterización del ciclo anual de cada una de las series obtenidas y se calcularon las tendencias a partir de las anomalías estandarizadas de dichas series como en Nguyen et al., (2015) y del test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) con un nivel de significancia del 95 %.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la posición latitudinal media anual y estacional de la extensión de la Celda de Hadley según métricas hemisféricas y regionales

La posición latitudinal media anual y estacional de la rama de descenso de la Celda de Hadley de las siete métricas hemisféricas y tres regionales calculadas a partir de los datos del reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se muestra en la Figura 2 (a y b). En cuanto a las métricas hemisféricas, la posición latitudinal media anual de las métricas de la troposfera alta (OLR y STJ) presenta valores entre los 30° y 35° S; mientras que las métricas de la troposfera baja (SLP, UAS, P-E y EDJ) presentan valores en el rango entre los 31° y 51° S. Las métricas P-E y EDJ presentan los valores latitudinales más altos, dichos valores oscilan entre los 41° y 51° S, respectivamente. En cuanto a las métricas regionales STRP, PSLR y PER, presentan valores latitudinales medios de 31°, 27° y 43° S, respectivamente. El valor latitudinal medio anual de la métrica STRP es similar a los valores obtenidos de las métricas SLP, UAS y ψ_{500hPa} . La métrica PSLR presenta el valor latitudinal medio anual

Métrica	Definición	Variable	Referencia	Escala
$\psi_{500 \text{ hPa}}$	Latitud donde la función corriente del flujo de masa en 500 hPa es igual a cero	Viento meridional (V)	Gastineau et al., (2008); Lu et al., (2007)	Global
SLP	Latitud del máximo de presión a nivel del mar	Presión a nivel del mar (SLP)	Choi et al., (2014); Hu et al., (2011); Nguyen et al., (2015)	Global
UAS	Latitud donde el viento zonal en superficie cambia de signo	Viento zonal a 10 metros (U10)	Davis y Bimer, (2013)	Global
P-E=0	Latitud donde la precipitación menos la evaporación es igual a cero	Precipitación (Pr) Evaporación (Er)	Lu et al., (2007)	Global
EDJ	Latitud del máximo del viento zonal medio en 850 hPa	Viento zonal en superficie (U)	Davis y Bimer, (2017)	Global
STJ	Corriente en chorro subtropical	Viento zonal troposférico(U)	Archer y Caldeira, (2008)	Global
OLR	Latitud donde la radiación de onda larga saliente es igual a 250 Wm^{-2}	Radiación de Onda Larga(OLR)	Hu y Fu, (2007); Johanson y Fu, (2009)	Global
STRP	Latitud del máximo de presión a nivel del mar del Anticiclón del Pacífico Sur	Presión a nivel del mar (SLP)	Barrett y Hameed, (2016)	Regional
PSI_R	Latitud donde la función corriente del flujo de masa en 500 hPa es igual a cero promediado zonalmente entre los $110^\circ \text{ W}-50^\circ \text{ W}$	Viento meridional (V)	Vera et al., (2019)	Regional
PER	Precipitación menos la evaporación es igual a cero entre los $110^\circ \text{ W}-50^\circ \text{ W}$	Precipitación (Pr) Evaporación (Er)	Construcción propia	Regional

Tabla 1: Métricas hemisféricas y regionales seleccionadas para la evaluación de la rama de descenso de la Celda de Hadley al sudoeste de América del sur.

ubicado más hacia latitudes bajas (27° S); mientras que la métrica PER junto a P-E y EDJ presentan un valor latitudinal ubicado más hacia latitudes altas (42° S).

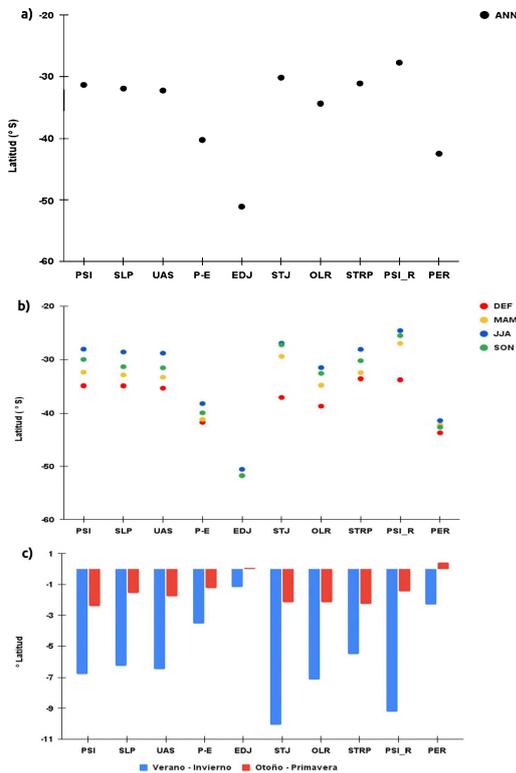


Figura 2: a) Posición latitudinal media anual (círculo azul) y b) estacional (DJF-círculo rojo; JJA-círculo azul; MAM-círculo amarillo; SON-círculo verde); c) diferencia latitudinal estacional de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021.

En relación a la estacionalidad (Figura 2b), se observa en casi todas las métricas el desplazamiento hacia el polo en verano y hacia el ecuador en invierno a excepción de EDJ, cuyo desplazamiento hacia el polo es máximo en primavera. En cuanto a la diferencia latitudinal entre las estaciones invierno- verano (Figura 2c), se observan diferencias latitudinales que superan los 3° de latitud en casi todas las métricas. Las métricas hemisféricas STJ, OLR y la métrica regional PSI_R presentan los mayores

valores de diferencias latitudinales, estos valores oscilan entre los 7° y 10° . En cuanto a las diferencias latitudinales entre las estaciones otoño - primavera, los valores oscilan entre 0.4° y 3° aproximadamente.

3.2. Correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} , las métricas hemisféricas y regionales

Los valores de correlación anual y estacional entre la métrica ψ_{500hPa} , las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 para el período 1979-2021 se muestran en la Figura 3. Los valores del coeficiente de correlación entre ψ_{500hPa} y las métricas hemisféricas de la troposfera alta STJ y OLR sólo son significativas estadísticamente en la escala anual y en la estación de verano con la métrica OLR y en la estación de invierno con la métrica STJ. Los valores del coeficiente de correlación tanto en la escala anual como estacional oscilan entre $r=-0.21$ y $r=0.49$.

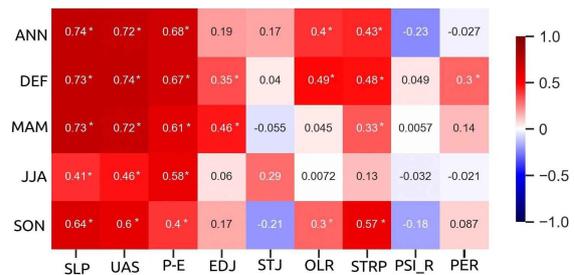


Figura 3: Correlación anual y estacional entre la métrica ψ_{500hPa} y las diferentes métricas hemisféricas y regionales obtenidas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95 % de confianza.

En relación a los valores del coeficiente de correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} y las métricas de la troposfera baja (SLP, UAS, P-E, EDJ), se observa significancia estadística, a escala anual y estacional, entre 500hPa y SLP,

UAS y P-E. En el caso de la métrica EDJ, solo se observa significancia estadística para las estaciones verano y otoño. Los valores del coeficiente de correlación en la escala anual y estacional oscilan entre $r=0.06$ y $r=0.74$.

En cuanto a los coeficientes de correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} y las métricas regionales (STRP, PSLR, PER), se encontró que la métrica STRP presenta valores del coeficiente de correlación significativos estadísticamente en la escala anual y en todas las estaciones, excepto en el invierno, mientras que la métrica PER sólo presenta correlación significativa en el verano. Los valores del coeficiente de correlación en la escala anual y estacional oscilan entre $r=-0.23$ y $r=0.57$.

3.3. Correlación anual y estacional entre pares de métricas hemisféricas y regionales

La correlación anual entre pares de métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 para el período 1979-2021 se muestra en la Figura 4. En cuanto a las métricas hemisféricas de la troposfera alta STJ y OLR; se observa que STJ sólo presenta correlación significativa con la métrica OLR, mientras que la métrica OLR presenta además correlación significativa con la métrica ψ_{500hPa} . La relación entre el STJ y OLR puede estar dada a partir de que los meandros del jet definen la formación de sistemas de altas y bajas presiones y estos se relacionan con la formación de nubosidad. El valor del coeficiente de correlación entre STJ y OLR es $r=0.42$; mientras que el valor de correlación entre las métricas OLR y ψ_{500hPa} es $r=0.4$.

En relación a las métricas hemisféricas de la troposfera baja SLP y UAS, éstas presentan un valor de correlación significativo de $r=0.97$. Además, ambas métricas presentan valores del coeficiente de correlación significativos con las métricas de la troposfera baja P-E, EDJ y la métrica regional STRP. La métrica P-E presenta valores de correlación significativos con

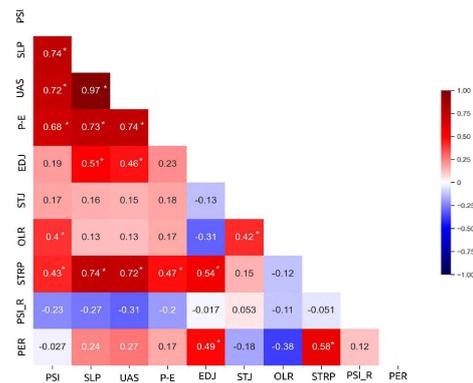


Figura 4: Correlación anual entre pares de métricas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95% de confianza.

las métricas de la troposfera baja SLP y UAS; y con la métrica regional STRP. En el caso de la métrica EDJ, presenta correlación significativa con las métricas de la troposfera baja SLP y UAS; además de las métricas regionales STRP y PER. En cuanto a las métricas regionales, la métrica STRP presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las métricas SLP, UAS, P-E, EDJ y PER. La métrica PER sólo presenta correlación significativa con la métrica regional STRP y la métrica de la troposfera baja EDJ.

Los valores de correlación estacional entre pares de métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 para el período 1979-2021 se muestran en la Figura A1. La métrica STJ solo presenta valores de correlación significativa con la métrica de la troposfera alta OLR (en verano y otoño); y la métrica regional PSLR en el verano. En relación a la métrica OLR, presenta además valores de correlación significativos con las métrica regional PSLR en el verano y otoño.

En cuanto a las métricas de la troposfera baja, SLP presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las métricas UAS, P-E, EDJ, STRP y PER en las estaciones

verano y otoño; con las métricas UAS, P-E, EDJ y STRP en el invierno y primavera. La métrica UAS presenta valores de correlación significativos con las métricas de la troposfera baja SLP, P-E, EDJ y con las métricas regionales STRP y PER en el verano. En otoño, presenta valores de correlación significativa con las métricas antes mencionadas a excepción de la métrica regional PER. En invierno, presenta valores de correlación significativas con SLP, P-E y la métrica regional STRP. La relación entre la métrica SLP y UAS es notable en todas las estaciones, presenta altos valores de correlación significativa, los valores oscilan entre $r=0.91$ (invierno) y $r=0.98$ (otoño).

En cuanto a la métrica P-E, presenta correlaciones significativas con las métricas SLP y UAS en todas las estaciones. En la estación de verano presenta valores significativos con la métrica de la troposfera baja EDJ y las métricas regionales STRP y PER, en tanto que en invierno la relación es significativa con la métrica STJ. La métrica EDJ presenta valores de correlación significativos con la métrica de la troposfera baja SLP y las métricas regionales STRP y PER en todas las estaciones. Además presenta valores de correlación significativos con la métrica de la troposfera baja UAS para las estaciones de verano, otoño y primavera y con la métrica de la troposfera baja P-E, en la estación del verano.

En relación a las métricas regionales, STRP, PSIR y PER presentan valores de correlación significativos con algunas métricas hemisféricas y entre ellas mismas. La correlación estacional de las métricas hemisféricas y regionales con STRP obtenidas del reanálisis ERA5 para el período de 1979-2021 se muestra en la Figura 5. La métrica regional STRP presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las métricas de la troposfera baja SLP, UAS y EDJ; y con la métrica regional PER en todas las estaciones. En el caso de los coeficientes de correlación asociados a la métrica de la troposfera baja P-E presentan valores de correlación positivos con significancia estadística

para las estaciones del verano y otoño austral. La métrica PER presenta valores de correlación significativos estadísticamente en todas las estaciones del año con las métricas EDJ y STRP. En la estación de verano, PER presenta además, correlaciones significativas estadísticamente con las métricas de la troposfera baja SLP, UAS, P-E y las métricas regionales STRP y PSIR.

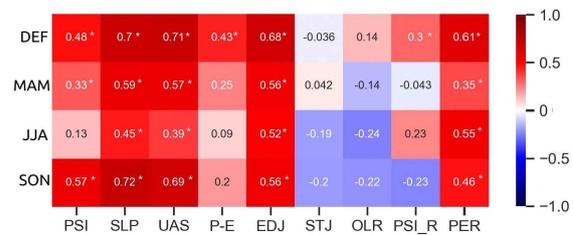


Figura 5: Correlación estacional entre la métrica regional STRP y las diferentes métricas hemisféricas y regionales obtenidas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95% de confianza.

En cuanto a la métrica PSIR presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las métricas de la troposfera alta STJ y OLR y las métricas regionales STRP y PER en la estación de verano, mientras que en el invierno austral solo con la métrica regional PER.

3.4. Variabilidad interanual, tendencias anuales y estacionales de las métricas hemisféricas y regionales

La variabilidad interanual de las anomalías estandarizadas de cada uno de los índices calculados para representar a la Celda de Hadley con sus respectivas tendencias se muestran en la Figura 6. De forma general, se observa que las métricas de la troposfera baja SLP y UAS presentan un patrón similar para el período de estudio, al igual que la métrica de la troposfera baja P-E con la métrica de referencia PSI.

Además, se observan valores negativos de las anomalías estandarizadas en las métricas PSI, SLP, UAS, P-E y la métrica regional STRP a partir del año 2007, lo cual indica una expansión hacia el polo de la Celda de Hadley. La métrica regional PSIR presenta valores positivos de las anomalías estandarizadas a partir del año 2007, lo cual indica contracción de la Celda de Hadley.

En relación a las tendencias anuales obtenidas de las anomalías estandarizadas se observa que las métricas de la troposfera baja SLP, UAS y P-E junto a la métrica de referencia PSI y la métrica regional STRP muestran tendencias negativas significativas estadísticamente Figura 6. Las tendencias negativas sugieren expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Este comportamiento también se observa en las diferencias obtenidas del promedio anual de la presión a nivel del mar y viento zonal en superficie para el período 2000-2021 menos 1979-1999, Figura A3. Las tendencias observadas en las variables presión a nivel del mar y el viento zonal en superficie Figura A3 c) y f), muestran un patrón de incremento de la presión a nivel del mar (+1.2 hPa) hacia el oeste del Océano Pacífico Sur, la expansión del ASPS hacia el polo y el fortalecimiento de los vientos del oeste. Por otro lado, las métricas STJ y PSIR son las únicas métricas que presentan tendencias positivas sin significancia estadística, lo cual indica contracción de la Celda de Hadley.

Las tendencias de promedios anuales por década de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se muestran en la Figura 7. La métrica ψ_{500hPa} , las métricas de la troposfera baja SLP, UAS, P-E y la métrica regional STRP muestran valores de tendencias negativas significativas, sugiriendo una expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Los valores de la tendencia por década oscilan entre -0.10° y -0.24° . La métrica regional PSIR presenta tendencia positiva sin significancia estadística (0.2°), que debería interpretarse como una contracción de la Celda de Hadley regional hacia el ecuador.

Las tendencias de promedios estacionales por década de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se muestran en la Figura 8. La métrica ψ_{500hPa} presenta tendencias negativas significativas estadísticamente para las estaciones de verano, otoño e invierno. La métrica hemisférica de la troposfera alta OLR presenta tendencia positiva significativa estadísticamente en el otoño, sugiriendo una contracción de la Celda de Hadley hacia el ecuador. En relación a las métricas de la troposfera baja, la métrica SLP presenta tendencias negativas significativas estadísticamente para las estaciones verano e invierno (-0.16° y -0.2° por década, respectivamente). La métrica UAS presenta tendencias negativas con valores que oscilan entre -0.10° y -0.27° por década, con significancia estadística en el invierno y primavera (-0.27° y -0.22° por década, respectivamente). Por otro lado, P-E presenta tendencias negativas estadísticamente significativas con valores que oscilan entre -0.17° y -0.32° por década para las estaciones verano, otoño e invierno (-0.17° , -0.30° y -0.32° por década, respectivamente). En cuanto a las métricas regionales, STRP y PER presentan tendencias significativas estadísticamente en la estación de verano (-0.21° y -0.22° por década, respectivamente).

4. DISCUSIÓN

Este trabajo proporciona una evaluación de las métricas más utilizadas para caracterizar la rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los últimos 40 años sobre la región del SWSA, a través del análisis de siete métricas hemisféricas y tres regionales obtenidas a partir de variables meteorológicas pertenecientes al reanálisis ERA5.

Los resultados encontrados muestran que existen diferencias latitudinales entre las métricas. La mayoría de las métricas presentan valores de posición latitudinal media anual en el rango entre los 30° S y 34° S, a excepción de las

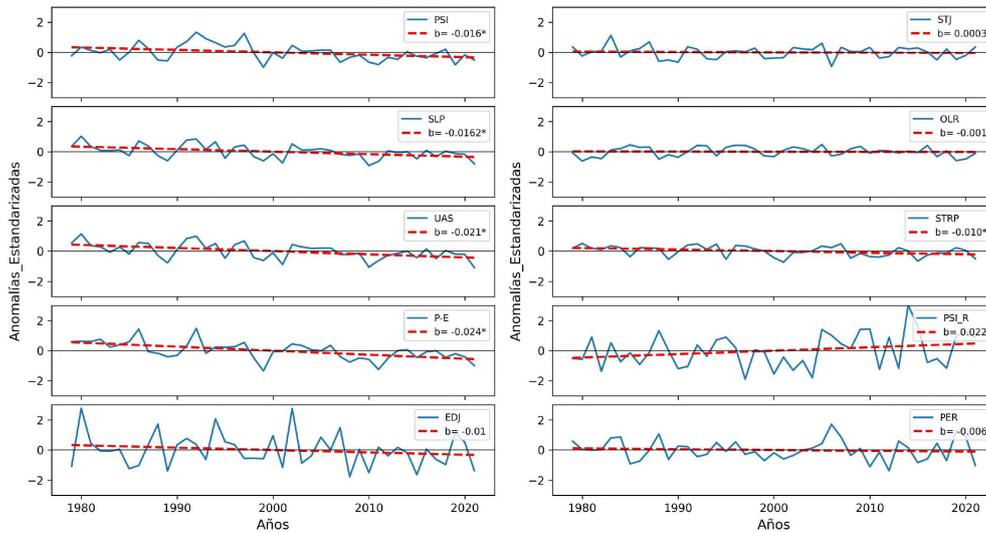


Figura 6: Anomalías estandarizadas por normalización (línea azul) y tendencias anuales (línea roja discontinua) de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA 5 durante el período de 1979-2021. El asterisco simboliza donde la tendencia anual es estadísticamente significativa a un 95 % nivel de confianza.

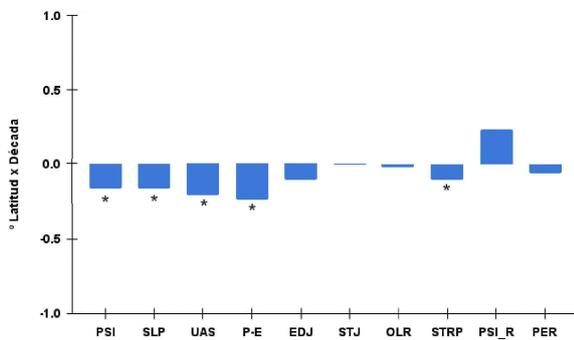


Figura 7: Tendencias anuales (grados de latitud por década) de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA 5 durante el período de 1979-2021. El asterisco simboliza donde la tendencia anual por década es estadísticamente significativa a un 95 % nivel de confianza.

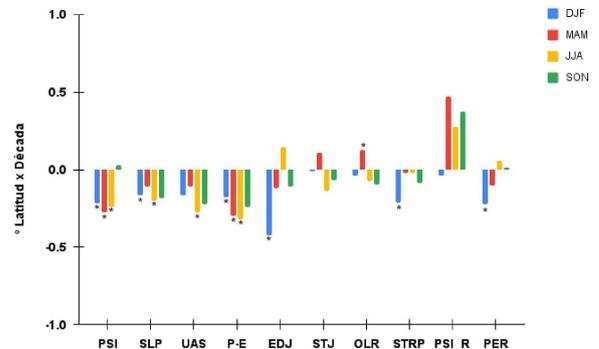


Figura 8: Tendencias estacionales por década de la rama de descenso de la Celda de Hadley durante el período de 1979-2021. El asterisco simboliza donde la tendencia estacional por década es estadísticamente significativa a un 95 % nivel de confianza.

métricas PSIR (27° S), EDJ, P-E y PER (entre 40° S y 51° S). Parte de estos resultados son consistentes con los encontrados por Davis y Rosenlof (2012), Solomon et al. (2016), Waugh

et al. (2018). Las diferencias latitudinales están asociadas a los distintos componentes de la circulación de Hadley que son considerados para derivar las diferentes métricas.

En relación al desplazamiento latitudinal hacia el polo de la rama descendente de la Celda de Hadley sugerido por las métricas EDJ y P-E, es importante notar que la métrica EDJ, asociada a los flujos de perturbaciones en las Ondas de Rossby (Davis y Birner, 2017), afectarían a la Celda de Hadley a través de la redistribución del calor y cantidad de movimiento en la atmósfera, induciendo la formación de la Celda de Ferrel y los flujos perturbados de latitudes medias (Staten et al., 2018). Por ello, la posición latitudinal de la métrica EDJ se ubica hacia el polo del borde de la Celda de Hadley en la región de latitudes medias (Figura 1). La métrica P-E representa la transición entre los subtrópicos áridos y las zonas de abundante precipitación en latitudes medias a altas y generalmente se localiza en el área de subsidencia que divide a la Celda de Hadley de la Celda de Ferrel (Davis y Birner, 2017). En cuanto a la posición más hacia el polo de la métrica regional PER con respecto a la métrica hemisférica P-E, podría estar dado por la diferencia de escala. Si bien ambas métricas se calculan a partir de un promedio zonal, P-E se calcula para todo el hemisferio sur; mientras que PER sobre una región específica (110° W - 50° W).

En relación a las posiciones latitudinales medias estacionales de cada una de las métricas (Fig. 2b), éstas presentan un comportamiento de migración hacia el polo en verano y hacia el ecuador en invierno a excepción de la métrica EDJ, cuya migración hacia el polo es máxima en primavera. Estos resultados son congruentes con estudios previos (Solomon et al., 2016; Grise y Polvani, 2016; Waugh et al., 2018) a excepción de la estación donde ocurre el máximo de la métrica EDJ. Este resultado puede estar asociado a la diferencia entre las bases de datos utilizadas (ERA5 en este estudio y los reanálisis centenarios, modernos y modelos climáticos en los estudios de Grise et al., 2018; Staten et al., 2018). Además, este comportamiento puede estar asociado a los cambios estratosféricos y al impacto de estos cambios sobre la troposfera. En estudios recientes (Byrne y Shepherd, 2018; Byrne et al., 2019) se ha encontrado que el

fortalecimiento del Vórtice Polar Estratosférico (SPV, por sus siglas en inglés) durante el período previo a su ruptura influye sobre la latitud del EDJ en la troposfera. Byrne et al. (2019) estudiaron la variabilidad acoplada entre el SPV y el EDJ, encontrando que durante los años en los que ocurre un retraso en primavera del ciclo estacional estratosférico suele producirse un retraso en el momento de la ruptura del SPV a principios de verano, lo cual pudiera estar asociado con un desplazamiento hacia el polo del EDJ en primavera y un retraso del desplazamiento del EDJ hacia el ecuador a principios de verano.

En cuanto a las relaciones entre la métrica de referencia ψ_{500hPa} , las métricas de la troposfera baja (SLP, UAS, P-E y EDJ) y la métrica de la troposfera alta STJ se observan diferencias en este trabajo que son consistentes con estudios previos (Solomon et al., 2016, Waugh et al., 2018, Staten et al., 2018). Las métricas de la troposfera baja (SLP, UAS y P-E) están más fuertemente relacionadas con ψ_{500hPa} , capturan en alguna medida la variabilidad en la latitud del cruce de ψ_{500hPa} por cero (Waugh et al., 2018); y EDJ se relaciona significativamente con ψ_{500hPa} en las estaciones de verano y otoño. Por el contrario, STJ sólo presenta relación significativa en el límite de la significancia estadística con la métrica ψ_{500hPa} en la estación del invierno austral. Las diferencias encontradas en las relaciones con ψ_{500hPa} se deben a que STJ está relacionada con la circulación de Hadley a través del gradiente de temperatura meridional, mientras que con las métricas de la troposfera baja la relación se da con el transporte de momento en la atmósfera (Davis y Birner, 2017; Grise et al., 2019). La relación entre ψ_{500hPa} y SLP está dada a partir de la subsidencia de la rama descendente de la Celda de Hadley la cual determina la presencia del cinturón de altas presiones alrededor de los 30° S y N. Así, como la relación significativa entre P-E y SLP, se debe a que la rama de descenso de la Celda de Hadley determina la posición de los sistemas de altas presiones semipermanentes subtropicales y las regiones donde se encuentran las zonas

subtropicales secas que separan los trópicos de los extratropicos (Cai et al., 2012).

Las relaciones entre ψ_{500hPa} y OLR encontrados en este trabajo tanto en la escala anual como estacional son contrarios a los obtenidos por Solomon et al. (2016) y Waugh et al. (2018), aunque la correlación entre ambas métricas es baja y se encuentra en el límite de la significancia estadística. Sin embargo, se obtuvieron correlaciones significativas en escala anual y en las estaciones de verano y primavera austral. Estas diferencias pueden deberse a diferencias en las bases de datos, metodologías y períodos de tiempos utilizados en el cálculo de las relaciones. Por ejemplo, Solomon et al., (2016) utilizan el ensamble de un solo modelo climático y los reanálisis del NCEP, ERA Interim y JRA-25 para dos períodos temporales (período histórico 1979 - 2005) y (proyecciones futuras del escenario RCP8.5 2006 - 2080). Waugh et al., (2018), utilizan las simulaciones de Control Preindustrial y las simulaciones con una cuadruplicación abrupta de CO_2 de 23 modelos climáticos pertenecientes al CMIP5 y en este trabajo se utiliza el reanálisis ERA5 para el período 1979 - 2021. En cuanto a las metodologías empleadas para determinar las correlaciones, Solomon et al., (2016) utilizan la correlación cruzada para cada una de las métricas separadas por mes, Waugh et al., utilizan el Coeficiente de Correlación de Pearson para la escala estacional y media anual. En este trabajo se calcula el Coeficiente de Correlación de Pearson a partir de la desestacionalización de las series temporales obtenidas.

En relación a las correlaciones entre ψ_{500hPa} y las métricas regionales, se encontraron resultados significativos estadísticamente con la métrica STRP. Las métricas ψ_{500hPa} y STRP presentan relaciones significativas en la escala anual y las estaciones verano, otoño y primavera austral. Estos resultados muestran la estrecha relación que existe entre la rama de descenso de la Celda de Hadley y la posición latitudinal del máximo de presión del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS). Esto se debe a

que la subsidencia que se genera en la rama descendente de la Celda de Hadley es uno de los mecanismos que incide sobre la presencia de los anticiclones subtropicales (Reboita et al., 2019).

Asimismo, las correlaciones significativas entre SLP y UAS encontradas en este trabajo en la escala anual y estacional son consistentes con las obtenidas por Adam et al. (2018), Choi et al. (2014), Waugh et al. (2018). Esta relación puede estar dada porque el viento zonal geostróficamente equilibrado cambia de signo donde el gradiente de presión meridional cambia de signo (Adam et al., 2018). Esto hace que exista proximidad entre la latitud del máximo de presión a nivel del mar y la latitud donde el viento zonal medio en la superficie cambia de signo. En cuanto a la relación entre STRP y SLP, ambas representan la latitud del máximo de presión a nivel del mar. Las diferencias entre ellas radica en la escala espacial y en el cómputo de las mismas. STRP se calcula atendiendo a las variaciones longitudinales a escala regional sobre el este del Pacífico Sur, mientras que SLP a partir de un promedio zonal para todo el Hemisferio Sur.

Además, en este trabajo se encontraron relaciones significativas entre las métricas EDJ, PER y STRP. Las métricas EDJ y PER capturan la variabilidad de la posición latitudinal del STRP tanto en la escala anual como estacional. Las métricas EDJ y PER podrían estar representando a las perturbaciones baroclínicas embebidas en el flujo de los oestes sobre latitudes medias, aproximadamente en el borde sur del ASPS en los 50° S (Varma et al., 2012; Flores-Aqueveque et al., 2020), y a la precipitación regional por el movimiento de estas perturbaciones en la banda latitudinal de la trayectoria de las tormentas.

Por otro lado, la relación significativa obtenida entre PSIR y PER en verano e invierno puede representar a la dinámica regional entre la Celda de Hadley y la precipitación, aunque sobre la región de estudio existen otros factores que inciden sobre la precipitación como

las complejas interacciones entre los patrones de circulación atmosféricos, la orografía y las diferencias latitudinales de la radiación (Flores-Aqueveque et al., 2020).

En relación a la variabilidad interanual de cada uno de los índices calculados para representar a la Celda de Hadley con sus respectivas tendencias, los resultados vinculados a la variabilidad de la métrica regional PSLR son consistentes con los encontrados por Saurral et al. (2017) y Vera y Díaz (2019). La evolución de la Celda de Hadley regional exhibe gran variabilidad interanual. En relación a los valores de tendencias anuales se observaron diferencias en las tendencias de las métricas PSI, SLP, UAS, P-E y PSIR antes y después del año 2007. Estas diferencias en las tendencias anuales también se observan para la presión a nivel del mar y el viento zonal en superficie en la Figura A3. Esto da cuenta de la influencia de los valores iniciales y finales sobre el valor de la tendencia.

En cuanto a las tendencias en los últimos 40 años, se encontró que la mayoría de las métricas utilizadas presentan tendencias negativas, lo cual sugiere expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Los resultados de las tendencias encontradas podrían explicar las tendencias decrecientes de la precipitación encontradas sobre la región del SWSA desde la década de 1980 (Garreaud et al., 2013, 2017, 2020; Boisier et al., 2016, 2018; Villamayor et al., 2021).

Las métricas ψ_{500hPa} , SLP, UAS, P-E y STRP presentan tendencias negativas significativas estadísticamente en la escala anual, mientras en la escala estacional ψ_{500hPa} , SLP y P-E presenta tendencias negativas significativas en más de una estación, STRP y PER en la estación de verano austral. Los resultados de tendencia encontrados en las métricas ψ_{500hPa} y UAS son consistentes con los obtenidos por Grise y Davis, (2020) para el reanálisis ERA5. No obstante, se observan diferencias en cuanto a la magnitud de los cambios. Estas diferencias pueden deberse a los diferentes períodos base utilizados para el cálculo de las tendencias. La

tendencia negativa significativa de STRP en la estación de verano austral es consistente con el resultado encontrado por Flores-Aqueveque et al., (2020).

En relación a las tasas de expansión obtenidas en este trabajo en los últimos 40 años tanto en la escala anual como estacional presentan valores menores a 0.5° de latitud por década. Estos valores son congruentes con las tasas de expansión documentadas previamente para el Hemisferio Sur mediante el uso de reanálisis modernos. Dichas tasas oscilan entre los 0.2° y los 0.5° de latitud por década (Adam et al., 2014; Studholme y Gulev, 2018; Staten et al., 2020; Xian et al., 2021).

En cuanto a las tendencias positivas de las métricas PSIR y OLR que sugieren eventual contracción de la Celda de Hadley para distintos períodos de tiempo y que son contrarias a las tendencias encontradas en el resto de las métricas pueden estar explicadas a partir de diferentes factores. Xian et al., (2021) señalan que el período de tiempo, las bases de datos utilizadas, los diferentes niveles de la atmósfera implicados en el cálculo de las métricas, las inhomogeneidades en los datos de entrada, las variaciones estacionales, las diversas metodologías empleadas para calcular la expansión de la Celda de Hadley, así como las diferencias en la asimilación de observaciones por los diferentes tipos de reanálisis pueden explicar las discrepancias en las métricas y las tendencias temporales.

La métrica PSIR fue construida con el objetivo de identificar la influencia del factor antropogénico y la variabilidad natural sobre los cambios observados en la precipitación sobre la región del Altiplano de América del Sur, entre los 15° S y 25° S (Vera y Díaz, 2019) en la estación del verano austral. El resultado de expansión en la estación del verano austral de PSIR es consistente en parte con lo documentado por Vera y Díaz, (2019), aunque existen discrepancias entre el período de tiempo y las bases de datos consideradas

entre ambos estudios, lo cual no permite realizar una comparación adecuada entre los resultados encontrados.

En cuanto a las diferencias de las tendencias obtenidas entre la métrica PSLR y el resto de las métricas en la escala anual y estacional puede estar dada por las diferencias de escalas espaciales. La métrica de referencia PSI y la regional PSLR se calculan de la misma forma, sólo varía la escala espacial. PSI se calcula a través de un promedio zonal para todo el hemisferio sur, mientras que PSLR se calcula a partir de un promedio zonal en la banda latitudinal 110° W y 50° W. Otro de los factores, puede ser los diferentes niveles de la atmósfera implicados en el cálculo de las métricas. OLR es una métrica de la troposfera alta y PSLR es una métrica de la troposfera media. En cuanto a las diferencias en las tendencias entre PSLR con las métrica regional STRP, la métrica regional STRP tiene en cuenta las variaciones longitudinales del máximo de presión a nivel del mar, mientras que PSLR es un promedio zonal sobre una región en específico. Ambas métricas presentan tendencias contrarias en la escala anual y en las estaciones a excepción del verano austral.

En el caso de la tendencia positiva de OLR en el otoño austral, lo cual sugiere contracción, es consistente con los resultados encontrados por Solomon et al., (2016). Aunque la base de datos utilizada, el período de tiempo y el cálculo de las tendencias son diferentes al utilizado en este estudio, lo cual no permite realizar una comparación adecuada entre los resultados encontrados.

5. CONCLUSIONES

Siete métricas hemisféricas y tres métricas regionales derivadas del reanálisis ERA5 a lo largo del período 1979-2021 fueron examinadas para determinar las variaciones en la posición latitudinal de la rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los últimos 40 años para la región del SWSA.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la métrica hemisférica de referencia ψ_{500hPa} y la regional STRP presentaron relaciones estadísticamente significativas con el resto de las métricas tanto en la escala anual como estacional. Ambas métricas presentan una estrecha relación con las métricas de la troposfera baja SLP y UAS en ambas escalas temporales. Sin embargo, STRP está estadísticamente relacionada con las métricas EDJ y PER en todas las estaciones, mientras que ψ_{500hPa} solo está significativamente correlacionado con P-E. Los resultados vinculados con la métrica STRP muestran la relación existente entre la posición latitudinal del ASPS con la rama de descenso de la Celda de Hadley, el flujo de los oestes, la trayectoria de las tormentas y la precipitación regional (Varma et al., 2012; Flores-Aqueveque et al., 2020). Esto se debe a que el ASPS forma parte de la circulación atmosférica de gran escala, conecta a la circulación de los vientos del oeste en latitudes medias con los vientos del este tropicales, incide sobre el tiempo y el clima de latitudes medias subtropicales sobre la región de estudio e influye sobre la precipitación regional (Fahad et al., 2020; Barrett y Hameed, 2016).

En cuanto a las tendencias en los últimos 40 años, se encontró que la mayoría de las métricas utilizadas presentan tendencias negativas (ψ_{500hPa} , SLP, UAS, P-E y la regional STRP), lo cual sugiere expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Los resultados de las tendencias encontradas podrían explicar las tendencias decrecientes de la precipitación encontradas sobre la región del SWSA desde la década de 1980 (Garreaud et al., 2013, 2017, 2020; Boisier et al., 2016, 2018; Villamayor et al., 2021). En relación a las tasas de expansión, se obtuvieron tasas menores a 0.5° de latitud por década en los últimos 40 años. Estas tasas de expansión se encuentran dentro del rango de expansión documentado previamente para el Hemisferio Sur, entre 0.2° y 0.5° de latitud por década.

Si bien, la mayoría de las métricas presentan

tendencias negativas y las tasas de expansión se encuentran dentro del rango de expansión documentado previamente para el Hemisferio Sur se observan diferencias en las tendencias y su magnitud entre ellas y con estudios previos. Estas diferencias pueden estar dadas por el período de tiempo, las bases de datos utilizadas, los diferentes niveles de la atmósfera implicadas en el cálculo de las métricas, las inhomogeneidades en los datos de entrada, las variaciones estacionales, las diversas metodologías empleadas para calcular la expansión de la Celda de Hadley, así como las diferencias en la asimilación de observaciones por los diferentes tipos de reanálisis (Xian et al., 2021).

Agradecimientos: "Los autores desean agradecer el apoyo obtenido por el proyecto THEMES (THE Mystery of the Expanding tropicS: from past to future), financiado por BNP Paribas Foundation, al proyecto Red Bosque-Clima (Mincyt, Argentina), contribución N^o 2 y a los desarrolladores del paquete en python Tropical Width Diagnostics (PyTropD), (Adam et al., 2018)".

ANEXO En el presente anexo se visualizan las figuras A1, A2 y A3, las cuales se encuentran mencionadas en el manuscrito.

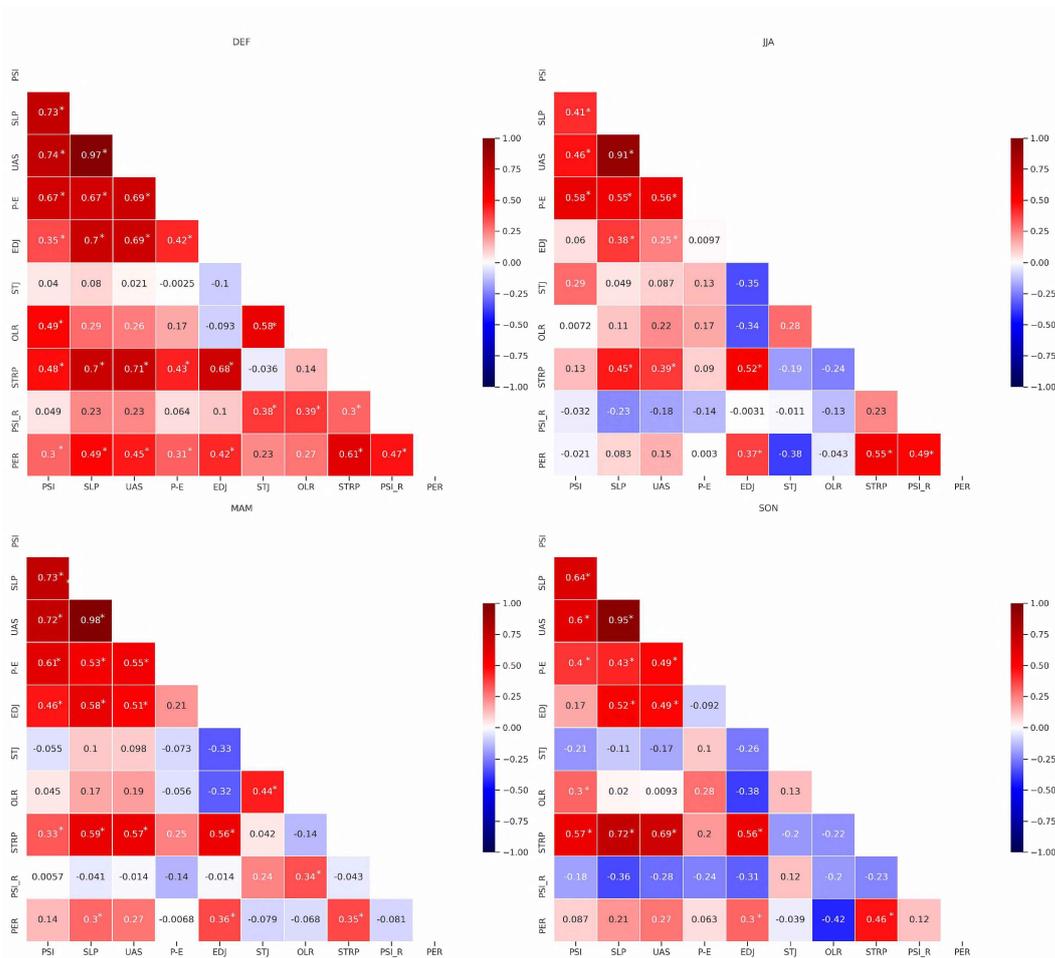


Figura A1: Correlación estacional entre pares de métricas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95 % de confianza.

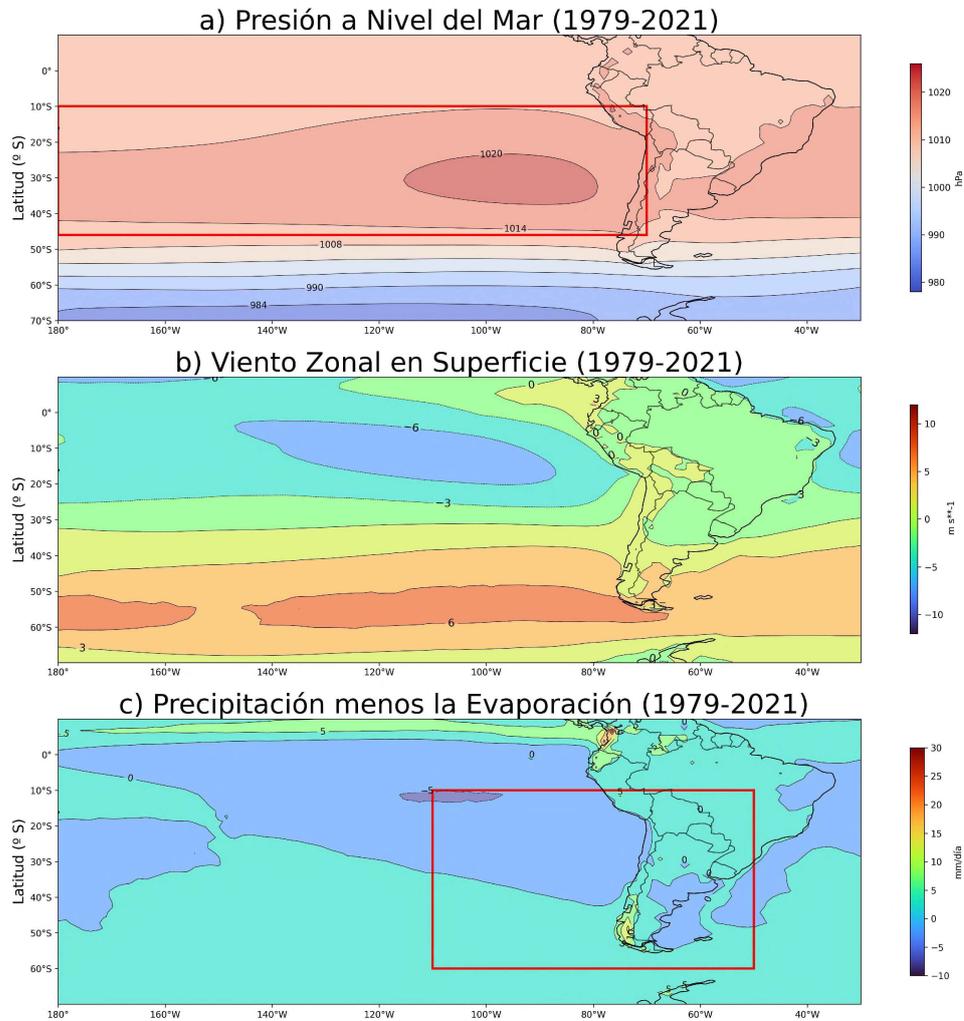


Figura A2: Promedio anual de: a) presión a nivel del mar (hPa), b) viento zonal en superficie (ms^{-1}) y la c) precipitación menos la evaporación (mm/día) para el período 1979 -2021. Las líneas rojas representan las bandas latitudinales y longitudinales utilizadas para el cálculo de las métricas regionales STRP, PSIR y PER.

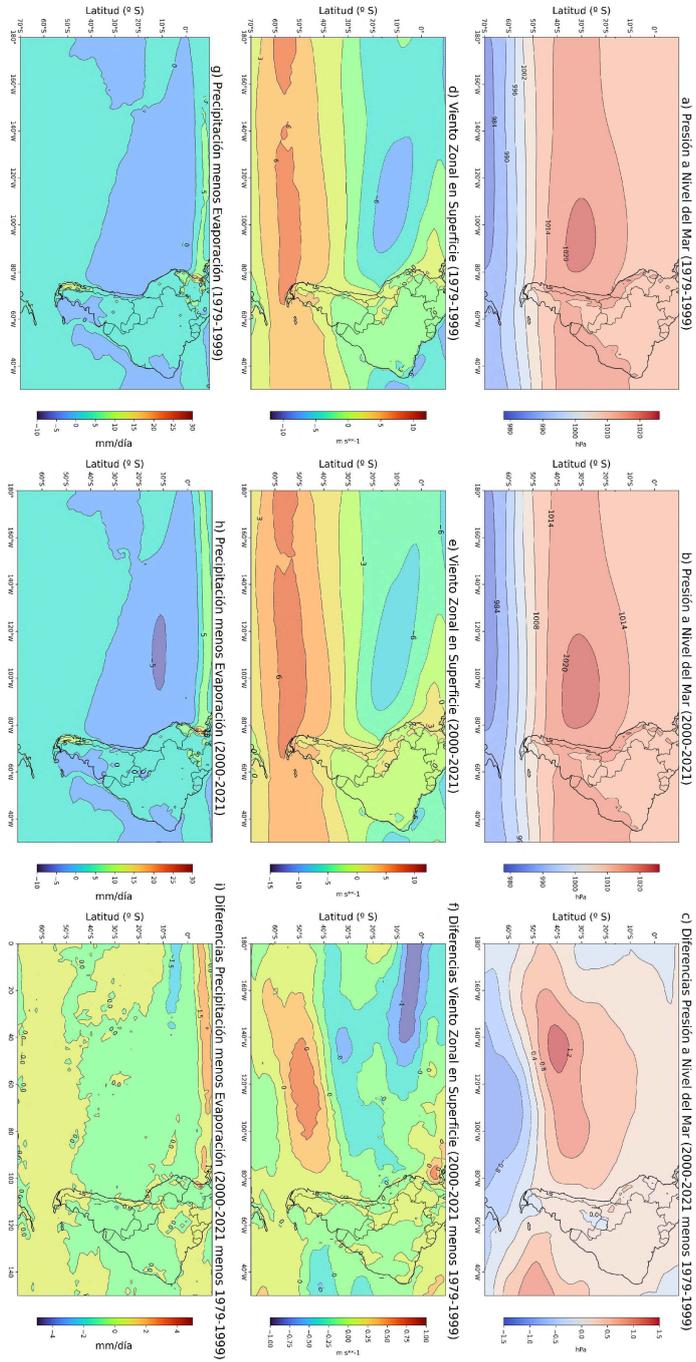


Figura A3: Media anual a) presión a nivel del mar 1979 - 1999 (hPa), b) presión a nivel del mar 2000 - 2021 (hPa), c) Diferencia presión a nivel del mar 2000 -2021 menos 1979 - 1999(hPa), d) viento zonal en superficie 1979 - 1999 (ms^{-1}), e) viento zonal en superficie 2000 - 2021 (ms^{-1}), f) Diferencia viento zonal en superficie 2000 -2021 menos 1979 - 1999(hPa), g) precipitación menos evaporación 1979 - 1999 (mm/día), h) precipitación menos evaporación 2000 - 2021 (mm/día), i) Diferencia precipitación menos evaporación 2000 -2021 menos 1979 - 1999 (mm/día).

REFERENCIAS

- Adam, O., T. Schneider, N. Harnik, 2014: Role of Changes in Mean Temperatures versus Temperature Gradients in the Recent Widening of the Hadley Circulation. *Journal of Climate*, VOLUME 27, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00140.1>
- Adam, O., y colaboradores, 2018: The TropD software package (v1): Standardized methods for calculating tropical-width diagnostics. *Geoscientific Model Development*, 11(10), 4339–4357. <https://doi.org/10.5194/gmd1143392018>
- Barrett, B. S. y Hameed, S., 2017: Seasonal Variability in Precipitation in Central and Southern Chile: Modulation by the South Pacific High. *J. Climate*, 30, 55–69. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0019.1>
- Bengtsson, L.; Hagemann, S.; Hodges, K.I., 2004: Can climate trends be calculated from reanalysis data? *J. Geophys. Res. Atmos.* 109, <https://doi.org/10.1029/2004JD004536>
- Birner, T., 2010: Recent widening of the tropical belt from global tropopause statistics: Sensitivities. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, <https://doi.org/10.1029/2010JD014664>
- Birner, T., Davis, S. M., y Seidel, D. J., 2014: The changing width of Earth's tropical belt. *Phys. Today*, 67, 38–44, <https://doi.org/10.1063/PT.3.2620>
- Boisier, JP, y colaboradores, 2018: Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elem Sci Anth*, 6: 74. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz, 2016: Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43, <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Byrne, N. J., y colaboradores, 2019: Subseasonal-to-seasonal predictability of the Southern Hemisphere Eddy-driven jet during austral spring and early summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 6841–6855. <https://doi.org/10.1029/2018JD030173>
- Byrne, N. J., y Shepherd, T. G., 2018: Seasonal persistence of circulation anomalies in the Southern Hemisphere stratosphere and its implications for the troposphere. *Journal of Climate*, 31(9), 3467–3483 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0557.1>
- Caballero, R., 2007: Role of eddies in the interannual variability of Hadley cell strength. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22705, <https://doi.org/10.1029/2007GL030971>
- Cai, W., y colaboradores, 2012: Rainfall reductions over Southern Hemisphere semiarid regions: the role of subtropical dry zone expansion. *Sci. Rep.*, 2, article number 702, <https://doi.org/10.1038/srep00702>
- Choi, J., y colaboradores, 2014: Further observational evidence of Hadley cell widening in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2590–2597, <https://doi.org/10.1002/2014GL059426>
- Chen, S., y colaboradores, 2014: Regional changes in the annual mean Hadley circulation in recent decades. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 7815–7832, <https://doi.org/10.1002/2014JD021540>
- Davis, N., Birner, T., 2017: On the Discrepancies in Tropical Belt Expansion between Reanalyses and Climate Models and among Tropical Belt Width Metrics. *Journal of Climate*, 30(4), 1211–1231, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0371.1>
- Davis, S. M., and K. H. Rosenlof, 2012: A multidagnostic intercomparison of tropical-width time series using reanalyses and satellite observations. *J. Clim.*, 25, 1061–1078, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00127.1>
- Díaz, L.B. y Vera, C.S., 2018: South American precipitation changes simulated by PMIP3/CMIP5 models during the Little Ice Age and the recent global warming period. *Int. Journal. Climatol.* 2018; 1-13, <https://doi.org/10.1002/joc.5449>
- Fahad, A. y colaboradores, 2020: How will southern hemisphere subtropical anticyclones respond to global warming? *Mechanisms and*

- seasonality in CMIP5 and CMIP6 model projections. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05290-7>
- Flores-Aqueveque, V y colaboradores, 2020: South Pacific Subtropical High from the late Holocene to the end of the 21st century: insights from climate proxies and general circulation models. *Clim. Past*, 16, 79–99, 2020, <https://doi.org/10.5194/cp-16-79-2020>
- Freitas, Ana Carolina y Ambrizzi, Tércio., 2015: Recent Changes in the Annual Mean Regional Hadley Circulation and Their Impacts on South America. *Advances in Meteorology*. Article ID 780205. <https://doi.org/10.1155/2015/780205>
- Garreaud R. D. y colaboradores, 2020: The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective, *International Journal Climate*, <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, RD. y colaboradores, 2017: The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol Earth Syst Sci* 21(12): 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R, Lopez, P, Minvielle, M and Rojas, M., 2013: Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *J Climate* 26(1): 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Grise, K. M. y Davis, S. M., 2020: Hadley cell expansion in CMIP6 models, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 5249–5268, <https://doi.org/10.5194/acp-20-5249-2020>
- Grise, K. M., y colaboradores, 2019: Recent tropical expansion: Natural variability or forced response? *J. Climate*, 32, 1551–1571, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0444.1>
- Grise, K. M., y colaboradores, 2018: Regional and seasonal characteristics of the recent expansion of the tropics, *J. Climate*, 31, 6839–6856, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0060.1>
- Grise, K. M. y Polvani, L. M, 2016: Is climate sensitivity related to dy-namical sensitivity?, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 5159–5176, <https://doi.org/10.1002/2015JD024687>
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kang, S y Polvani. L, 2011: The Interannual Relationship between the Latitude of the Eddy-Driven Jet and the Edge of the Hadley Cell, *Journal of Climate*, VOLUME 24, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI4077.1>
- Kendall, M. G., 1975: *Rank Correlation Methods*, Griffin, London.
- Lucas, C., y colaboradores, 2014: The expanding tropics: a critical assessment of the observational an modeling studies. *WIREs Clim Change* 5: 89–112.
- Lucas, C., y Nguyen, H., 2015: Regional characteristics of tropical expansion and the role of climate variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14), 6809–6824. <https://doi.org/10.1002/2015JD023130>
- Mann, H. B., 1945: 'Nonparametric tests against trend', *Econometrica* 13, 245–259, <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mantua, NJ, Hare, SR, Zhang, Y, Wallace, JM y Francis, RC, 1997: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull Amer Meteor Soc* 78(6): 1069–1079. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- Manney, G. L., y Hegglin, M. I., 2018: Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalyses. *Journal of Climate*, 31(1), 423–448, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0303.1>
- Montecinos, A and Aceituno, P., 2003: Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated

- Circulation Anomalies. *J Climate* 16(2): 281–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2)
- Morales M.S., y colaboradores, 2020: Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *PNAS*, July 21, 2020, vol. 117, no. 29, 16817, <https://doi.org/10.1073/pnas.2002411117>
- Nguyen y colaboradores, 2017: Variability of the extent of the Hadley circulation in the southern hemisphere: a regional perspective. *Clim Dyn*, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3592-2>
- Rivas, M. B., y A. Stoffelen, 2019: Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Sci.*, 15, 831–852, <https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019>
- Reboita, M. y colaboradores, 2019: The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. *Front. Earth Sci.* 7:8. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008>
- Rutllant, J y Fuenzalida, H., 1991: Synoptic aspects of the central chile rainfall variability associated with the southern oscillation. *Int J Climatol* 11(1): 63–76. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110105>
- Saurral y colaboradores, 2017: Low-frequency variability and trends in centennial precipitation stations in southern South America. *Int. J. Climatol.* 37: 1774–1793, <https://doi.org/10.1002/joc.4810>
- Solomon, A., y colaboradores, 2016: Contrasting upper and lower atmospheric metrics of tropical expansion in the Southern Hemisphere, *Geophys. Res.Lett.*,43, 10,496–10,503, <https://doi.org/10.1002/2016GL070917>
- Souza E. B, y Ambrizzi T, 2002: ENSO impacts on the South American rainfall during 1980s: Hadley and Walker circulation. *Atmósfera* 15: 105–120, <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8492>
- Schwendike, J.P. y colaboradores, 2014: Local Partitioning of the overturning circulation in the tropics and the connection to the Hadley and Walker circulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 1322– 1339, <https://doi.org/10.1002/2013JD020742>
- Staten y colaboradores, 2020: Tropical Widening From Global Variations to Regional Impacts, *American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0047.1>
- Staten, P.W., Grise, K.M, Davis, S.M.,Karnauskas, K.B, Davis, N.A., 2019: Regional widening of tropical overturning: Forced change, natural variability, and recent trends, *American Geophysical Union*, <https://doi.org/10.1029/2018JD030100>
- Staten, P.W. y colaboradores, 2018: Re-examining tropical expansion. *Nature Climate Change*, 8(9), 768-775. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>
- Studholme, J., y S. Gulev, 2018: Concurrent Changes to Hadley Circulation and the Meridional Distribution of Tropical Cyclones. *J. Climate.* <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0852.1>
- Varma, V., y colaboradores, 2012: Holocene evolution of the Southern Hemisphere westerly winds in transient simulations with global climate models. *Climate of the Past* 8: 391–402, <https://doi.org/10.5194/cp-8-391-2012>
- Vera, C.S y colaboradores, 2019: Influence of Anthropogenically-Forced Global Warming and Natural Climate Variability in the Rainfall Changes Observed Over the South American Altiplano. *Front. Environ. Sci.*, 13 June 2019, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00087>
- Vera, CS y Díaz, L., 2015: Anthropogenic influence on summer precipitation trends over South America in CMIP5 models. *International Journal of Climatology* 35(10): 3172–3177, <https://doi.org/10.1002/joc.4153>
- Villamayor y colaboradores, 2021: Causes of the long-term variability of southwestern South America precipitation in the IPSL- CM6A-LR model. *Climate Dynamics*, Springer Verlag, <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05811-y>
- Vuille y colaboradores, 2015: Impact of the global warming hiatus on Andean

temperature, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3745–3757, <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>

Vuille y colaboradores, 2000: Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, NO. D10, <https://doi.org/10.1029/2000JD900134>

Waugh, D. W y colaboradores, 2018: Revisiting the relationship among metrics of tropical expansion. *J. Clim.* 31, 7565–7581, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0108.1>

Xian, T., y colaboradores, 2021: Is Hadley Cell Expanding? *Atmosphere*, 12, 1699, <https://doi.org/10.3390/atmos12121699>

Zaplotnik y colaboradores, 2022: Recent Hadley Circulation Strengthening: A Trend or Multidecadal Variability?, *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0204.1>