

ANÁLISIS DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS Y SUS EXTREMOS A PARTIR DE DIFERENTES ÍNDICES DURANTE EL PERÍODO 1966-2015 EN EL NORTE GRANDE CHILENO

MEAN AND EXTREMES TEMPERATURES ACCORDING SEVERAL INDICES DURING THE 1966-2015 PERIOD IN THE CHILEAN NORTE GRANDE

Óliver Meseguer Ruiz*, Oscar Corvacho**, Alejandro Tapia Tosetti**,
José Fabián López Cepeda** y Pablo Sarricolea***

Según el V informe del Intergovernmental Panel on Climate Change, el norte de Chile es uno de los territorios que más se verán afectados por los cambios en las dinámicas atmosféricas en los próximos años. Dentro de este contexto general, un pilar capital lo constituyen las temperaturas y las modificaciones que en ella se han venido registrando. Se ha estudiado el comportamiento de las temperaturas de 4 observatorios del norte de Chile. Para detectar posibles tendencias en las series, se ha aplicado el test no paramétrico de Mann-Kendall, en primer lugar, a las temperaturas medias mensuales, y, posteriormente, a 12 índices diferentes calculados a partir de los extremos diarios de temperaturas desde 1966 hasta 2015. Si bien las medias mensuales no muestran unas tendencias claras significativas en el período estudiado, coincidiendo con los estudios que señalan la observación del Global Warming Hiatus, los otros índices de los extremos muestran tendencias significativas (90%), que indican, principalmente, un claro aumento de las temperaturas mínimas, así como una disminución evidente del número de días anuales en los que se registran temperaturas del percentil inferior.

Palabras claves: Temperatura media, temperatura extrema, tendencia, Norte Grande, Chile.

According to the AR5 from the Intergovernmental Panel on Climate Change, northern Chile is one of the most affected region by the next years-changes in the atmospheric dynamics. Within this general context, the temperature and its modifications constitute a capital pillar. The behavior of the temperatures from 4 observatories in northern Chile have been studied. To detect possible trends in the time series, the non-parametrical Mann-Kendall test has been applied to the monthly mean temperatures in a first place, and, after that, to twelve different indices calculated according to the daily extreme temperature from 1966 to 2015. While monthly means do not show a significant trend in the studied period, coinciding with studies indicating the observation of the Global Warming Hiatus, the other extremes indices show significant (90%) trends, indicating a clear increase in minimum temperatures and a clear decrease in the number of annual days with minimum temperatures in the lower percentile.

Key words: Mean temperature, extreme temperature, trend, Norte Grande, Chile.

Introducción

En la actualidad, a nivel planetario se asiste a un contexto ambiental marcado por el Cambio Climático (IPCC 2013) que afecta a las diferentes variables atmosféricas de distintas maneras, y el marco conceptual más generalmente aceptado corresponde al calentamiento global, entendido como la tendencia al aumento de las temperaturas planetarias. El Norte Grande chileno (desde los 17° hasta los 29° S) es afectado por unas dinámicas atmosféricas concretas que otorgan a esta región

una personalidad climática muy particular, con un carácter seco predominante por encima de todos (Sarricolea *et al.* 2017). Las preocupaciones crecientes acerca de los impactos del cambio climático relativos a las temperaturas hacen que esta sea una de las variables meteorológicas más investigadas, en parte debido a su influencia en los sistemas naturales y en las actividades humanas (IPCC 2013). Efectivamente, la temperatura afecta numerosos aspectos ambientales, como el crecimiento de los cultivos, las zonaciones agroecológicas, y en poder asegurar el abastecimiento de comidas (Ye

* Universidad de Tarapacá, Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas. Arica, Chile. Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. Correo electrónico: omeseguer@uta.cl

** Universidad de Tarapacá, Departamento de Ciencias Históricas y Geográficas. Arica, Chile. Correos electrónicos: ocorvacho@uta.cl; atapia@uta.cl; jlopezc@uta.cl

*** Universidad de Chile, Departamento de Geografía. Santiago, Chile. Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. Correo electrónico: psarricolea@uchilefau.cl

et al. 2013; Gabaldón-Leal *et al.* 2017; Tian *et al.* 2017). Además, unas temperaturas superiores a determinados valores críticos pueden resultar en un incremento de la mortalidad (Keelings y Waylen 2012). Numerosos estudios han demostrado que el aumento de las temperaturas puede acelerar e intensificar los ciclos climático e hidrológico, afectando la precipitación global en lo referente a su cantidad y a su intensidad, al régimen de los ríos, a la humedad del suelo y a los balances de evapotranspiración (Labat *et al.* 2004; Zhai *et al.* 2005; Guan *et al.* 2015). El aumento de los valores de temperatura media a lo largo del último siglo ha sido ampliamente demostrado por numerosos estudios en diferentes regiones del mundo, tanto en una escala espacial amplia (Vose *et al.* 2005; Klok y Tank 2009) como a escala local (del Río *et al.* 2012; Pellicone *et al.* 2014; Caloiero *et al.* 2015). En lo que refiere al Pacífico Sur, Salinger (1995) evidenció que las temperaturas máximas y mínimas diarias se han incrementado generalmente en toda el área en los últimos años del siglo pasado. En Australia, desde 1951, se detectó un aumento de entre 0,1-0,2 °C/década en las temperaturas medias de gran parte del país, sobre todo en aquellas alejadas de la costa (Hughes 2003). Además, la ocurrencia de eventos cálidos extremos acoplados con aumentos de las temperaturas medias han ocurrido más frecuentemente en el período 1957-1996, a la vez que se ha evidenciado un descenso en el número de los eventos fríos (Plummer *et al.* 1999; Caloiero 2016).

En adición a las temperaturas medias, los investigadores también han trabajado en la variabilidad de los extremos de la temperatura del aire superficial durante las últimas décadas (Guan *et al.* 2015; Wang *et al.* 2017). De hecho, la comunidad climática se muestra de acuerdo con el hecho que cualquier cambio en la frecuencia o intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos podría tener consecuencias más serias y profundas en la agricultura, los ecosistemas y en la sociedad que aquellos producidos en los valores medios (Guan *et al.* 2015). Katz y Brown (1992) evidenciaron que el cambio climático afecta principalmente a los valores extremos, de tal forma que pequeños cambios en las condiciones medias puede provocar grandes cambios en la frecuencia de los extremos (Salinger y Griffiths 2001). A nivel global se han detectado cambios relevantes en los extremos a lo largo del siglo XX. Particularmente, mientras que

se ha evidenciado una tendencia clara en la mayoría de los extremos relativos a bajas temperaturas en multitud de regiones a lo largo del mundo a fines del siglo XX, no se han detectado al mismo nivel cambios significativos relativos a las altas temperaturas (Salinger y Griffiths 2001). Debido a la importancia de los extremos de las temperaturas, mundialmente numerosos estudios se han desarrollado a escala regional y local (Klein Tank y Können 2003; Alexander *et al.* 2006; Klein Tank *et al.* 2006; Skansi *et al.* 2013; Liang *et al.* 2014).

Es bien conocida la importancia de la agricultura en Chile, y esta es sensible a las fluctuaciones de las temperaturas entre un año y el siguiente. Las altas temperaturas pueden agravar las sequías e incrementar la posibilidad de incendios. Muy altas temperaturas pueden también dañar los cultivos y reducir su rendimiento. En oposición, las bajas temperaturas pueden provocar heladas y, dependiendo de la parte del país, fuertes tormentas de nieve; aunque las bajas temperaturas también son importantes para determinadas especies hortícolas y para el crecimiento de algunos cereales (Salinger y Griffiths 2001).

En el caso específico del Norte Grande chileno, el aumento de los valores térmicos debería tender a producir grandes alteraciones en el ciclo hidrológico (Held y Soden 2006), afectándose con ello aún más la condición deficitaria en cuanto a la disponibilidad de agua frente a una demanda creciente que se asocia al proceso de crecimiento económico experimentado por el país, el sostenido aumento de la población en los centros urbanos de la zona y, en especial, por el desarrollo de la minería localizada en el Desierto de Atacama, actividad que le otorga a Chile cuantiosos beneficios económicos, y de la que depende en gran medida la riqueza del país. En los últimos años la concreción de grandes proyectos mineros en la zona ha traído consigo la intensificación de una notoria competencia por el uso del agua con las actividades agrícola y ganadera tradicionales de los sectores de montaña, y la agricultura de oasis de los valles costeros de gran importancia regional, desarrolladas fundamentalmente por poblaciones originarias; así como también con los requerimientos de uso urbano que demandan más de un millón de habitantes asentados principalmente en ciudades costeras (INE 2010).

La Dirección General de Aguas, el 2011, destacó la condición deficitaria del recurso hídrico en la zona del Norte Grande, al establecer para las

regiones XV y I (Arica y Parinacota y Tarapacá) la demanda de agua en 16,7 m³/s y la oferta en 11,9 m³/s, y para la Región II (Antofagasta) 23,0 m³/s de demanda y 0,9 m³/s de oferta, déficit que se agudizará de acuerdo con las proyecciones de la demanda realizadas para el año 2026, que se estiman del orden de 26,3 m³/s para el conjunto de las regiones XV y I, y de 34,8 m³/s para la II Región (Ministerio del Interior 2015), situación que impone la necesidad del estudio de las tendencias y variabilidades que presenta el clima regional con la finalidad de favorecer la capacidad de respuesta de la sociedad a los fenómenos naturales.

Sin embargo, en los últimos años se ha dado una disminución del ritmo del calentamiento cuyas causas aún están por determinar. Algunos investigadores afirman que la sensibilidad del clima podría haberse sobreestimado (Otto *et al.* 2013), otros apuntan a la incompleta cobertura a nivel global de las observaciones de temperatura y que este aumento de las mismas no está quedando registrado en aquellas regiones donde no hay una buena red de observatorios (Cowtan y Way 2014), o también debido a cambios en la actividad solar y en los aerosoles estratosféricos y troposféricos que hubieran provocado un estancamiento de las tendencias de temperatura en la última década (Solomon *et al.* 2011; Santer *et al.* 2014). En cualquier caso, la evidencia parece sugerir que el superávit de energía ha sido almacenado en los océanos (Meehl *et al.* 2011; Guemas *et al.* 2013), particularmente en el Pacífico ecuatorial (Kosaka y Xie 2013), en relación con la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el fortalecimiento de los *trade winds* (Trenberth y Fasullo 2013; England *et al.* 2014; Meehl *et al.* 2014).

Pese a todo, no existe otro lugar a nivel mundial en el que este receso en el calentamiento aparezca de forma tan evidente como a lo largo de la costa del norte de Chile (Vuille *et al.* 2015) y en sus montañas (Bennett *et al.* 2016), donde la temperatura aumentó significativamente durante la mayor parte del siglo XX (Rosenblüth *et al.* 1997), pero luego empezó a decaer, resultando en un enfriamiento sostenido de hasta -0,20 °C/década a lo largo de los últimos 20-30 años (Falvey y Garreaud 2009; Schulz *et al.* 2012). Falvey y Garreaud (2009) atribuyeron parcialmente el enfriamiento observado a cambios en la variabilidad decadal del Pacífico y sugirieron que la intensificación proyectada del APS y la consiguiente intensificación de las corrientes de *upwelling* de

aguas frías por debajo de la termoclina ayudarían a enfriar la región en el futuro. Independientemente de este enfriamiento lejos de la costa, los glaciares andinos siguen retrocediendo (Rabatel *et al.* 2013), lo que ha desembocado en proyectos de reanálisis de los datos de temperatura en algunas regiones de los Andes (Schauwecker *et al.* 2014).

Al mismo tiempo, la temperatura a lo largo de la costa occidental del Pacífico tropical (Perú y Ecuador) alcanzó valores máximos en la segunda mitad del siglo XX (Vuille y Bradley 2000; Vuille *et al.* 2003, 2008; Marengo *et al.* 2011). Otros estudios regionales también documentan tendencias de calentamiento significativas en el mismo período en los Andes peruanos (Bradley *et al.* 2009; Lavado Casimiro *et al.* 2013; Salzmann *et al.* 2013), en los de Bolivia (Thibeault *et al.* 2010; Seiler *et al.* 2013) y en los de Colombia (Poveda y Pineda 2009).

Un tema común que emerge de todos estos estudios es que parecen existir amplias diferencias entre las tendencias de las temperaturas observadas entre los trópicos y las áreas fuera de ellos y entre el calentamiento de los continentes y el enfriamiento de los océanos lejos de las costas. Sigue siendo incierto si el reciente enfriamiento anómalo afecta únicamente las latitudes medias de la costa occidental de Sudamérica o si sus efectos se extienden hasta los trópicos. Estudios más antiguos no detectan este enfriamiento (Vuille y Bradley 2000), pero esto podría reflejar también que únicamente se trabajó aquí con datos del siglo XX, lo que no incluiría el reciente período de enfriamiento.

Los objetivos de este trabajo consistirán por lo tanto en analizar las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas mensuales y después investigar la magnitud y la distribución espacial de los extremos de la temperatura en el Norte Grande chileno durante el período 1966-2015 utilizando 12 índices propuestos por el Expert Team on Climate Change Detection Indices (ETCCDI) (Zhang *et al.* 2011), así como arrojar luz acerca de las características espaciotemporales de las variaciones de la temperatura en el norte de Chile.

Metodología y Datos Utilizados

Con el objetivo de detectar cambios en los extremos climáticos, es importante desarrollar ciertos índices estadísticamente robustos y que sean aplicables a la mayoría de climas mundiales.

Los índices internacionalmente aceptados para las temperaturas diarias arrojan resultados que pueden ser comparados consistentemente entre diferentes países y regiones y sobrepasan las restricciones que presentan la habitual diseminación de observatorios diarios en la mayor parte de las regiones.

Frich *et al.* (2002) definieron algunos índices que, posteriormente, pasaron a ser conocidos como los índices ETCCDI y que se basaban en los índices propuestos previamente por la European Climate Assessment (ECA) (2002) para analizar tendencias en la segunda mitad del siglo XX. Estos índices fueron seleccionados para que pudieran albergar una amplia variedad de climas. Para este trabajo se aplicará una selección de 12 de los 29 índices del ETCCDI (Tabla 1).

Algunos de estos índices (TXx, TNx, TXn y TNn) miden la temperatura diaria máxima o mínima a nivel mensual o anual. Otros índices permiten calcular cuántos días al año exceden umbrales específicos con valores fijos o que hacen referencia un período climático de base, como ya se ha comentado. Sin embargo, los índices que se basan en umbrales percentiles (TN10p, TX10p, TN90p, TX90p y WSDI) son preferibles a la hora de realizar comparaciones espaciales de los extremos. Esto se debe a que las muestras de distribución de temperatura pueden ser diferentes cuando se usan índices de conteo con umbrales fijos en áreas grandes. Por ejemplo, el calor continuado en climas de latitudes medias puede encontrar un buen indicador en el número de días con temperatura mínima superior a 20 °C (TR20); por el contrario, en latitudes bajas, donde la mayor parte de las noches estivales arrojan

temperaturas mínimas por encima de ese umbral, la variabilidad en el número anual de noches con temperaturas superiores a 20 °C viene condicionado sobre todo por las condiciones en primavera y en otoño. Además, un índice, como el número de días de verano con máximas superiores a 25 °C (SU25), puede indicar condiciones anormalmente cálidas en un clima templado habitual, donde la media de las máximas de verano ronda los 18 °C (Zhang *et al.* 2011).

Para poder determinar la posible existencia de tendencias temporales en las máximas y mínimas mensuales y en los índices de extremos, las series de temperaturas medias mensuales y extremas diarias se analizan, y su significación estadística vendrá determinada por el conocido test no paramétrico de Mann-Kendall (MK) (Mann 1945; Kendall 1962). El estadístico MK se obtiene:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$(x_j - x_i) = z$$

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} 1 & \text{si } (z) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (z) = 0 \\ -1 & \text{si } (z) \leq 0 \end{cases}$$

Donde n es la dimensión de las series y x_j y x_i son los valores anuales, respectivamente, en los años j e i , con $j > i$. Para $n > 10$, dado que x_i es una serie independiente y aleatoriamente ordenada, el estadístico S sigue una distribución normal cuya media y varianza son iguales a 0, dado por:

Tabla 1. Índices de temperatura extrema utilizados. Fuente: Extraído y modificado de Klein Tank *et al.* (2002).

| Índice | Nombre | Definición | Unidad |
|--------|---|---|--------|
| TXx | T _{max} Max | Valor máximo mensual de la temperatura máxima diaria | °C |
| TNx | T _{min} Max | Valor máximo mensual de la temperatura mínima diaria | °C |
| TXn | T _{max} Min | Valor mínimo mensual de la temperatura máxima diaria | °C |
| TNn | T _{min} Min | Valor mínimo mensual de la temperatura mínima diaria | °C |
| TN10p | Noches frías | Conteo anual de temperaturas mínimas diarias <10° percentil | Días |
| TX10p | Días fríos | Conteo anual de temperaturas máximas diarias <10° percentil | Días |
| TN90p | Noches cálidas | Conteo anual de temperaturas mínimas diarias >90° percentil | Días |
| TX90p | Días cálidos | Conteo anual de temperaturas máximas diarias >90° percentil | Días |
| DTR | Rango diario de temperatura | Diferencia media mensual entre la temperatura máxima y mínima diaria | °C |
| SU25 | Días de verano | Conteo anual de días con temperatura máxima > 25°C | Días |
| TR20 | Noches tropicales | Conteo anual de días con temperatura mínima >20°C | Días |
| WSDI | Indicador de duración de período cálido | Conteo anual de eventos de al menos 6 días consecutivos con temperatura máxima >90° percentil | Días |

$$Var(S) = \left[n(n-1)(2n+5) \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5) \right] / 18$$

Donde t_i representa un margen de error de ancho i .

El test estadístico estandarizado Z_{MK} sigue una distribución normal estándar, y se representa:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \text{ para } S > 0 \\ 0 \text{ para } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} \text{ para } S < 0 \end{cases}$$

Utilizando un test de doble precisión, si Z_{MK} es superior a $Z_{\alpha/2}$, con un nivel de significancia α , entonces es posible rechazar la hipótesis nula y la tendencia se puede considerar significativa.

Resultados

Análisis de las temperaturas mensuales

Los resultados de los análisis de tendencias aplicados a las series de temperatura media mensual de los cuatro observatorios (nivel de significancia del 90%) se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 1. En los observatorios de Arica y Antofagasta se ha dado una tendencia al aumento de las temperaturas medias mensuales, en los primeros meses del año en ambos casos (con ritmos máximos de 0,19 y 0,21 °C/década, respectivamente).

En los meses tardoinvernales y primaverales para Antofagasta también se da un aumento significativo de las medias mensuales, llegando a 0,18 °C/década en septiembre. En el caso de la ciudad de Iquique,

las tendencias de las temperaturas medias se ha registrado a la baja, significativamente en el último trimestre anual, con valor máximo de -0,29 °C/década en octubre. En el observatorio de Calama no se ha registrado ninguna tendencia significativa en las medias mensuales.

Análisis de las temperaturas extremas diarias

El análisis de las temperaturas extremas diarias en el norte de Chile revela cambios significativos (nivel de significancia del 90%), así como se muestra en la Tabla 3 y en la Figura 2.

Un comportamiento significativo del índice TXx únicamente se registra en Iquique, con un aumento de 0,35 °C/década, mientras que el TXn solo es representativo en Calama, donde este índice presenta una tendencia de -0,15 °C/década. Las temperaturas mínimas, por su parte, presentan un comportamiento mucho más al alza, ya que muestran un aumento significativo de las más elevadas en las localidades costeras y en todos los observatorios en el comportamiento de las mínimas más elevadas. En la misma línea han evolucionado los índices TN10p y TN90p, que presentan una disminución de hasta 8,94 días por década de días con temperaturas mínimas en el percentil 10% inferior, mientras que las que se encuentran el 10% superior aumentan en todos los observatorios considerados. El comportamiento de las temperaturas máximas no es tan evidente, disminuyendo incluso en dos casos.

Esto ha provocado que las diferencias entre las máximas y las mínimas diarias se hayan reducido de manera significativa en todos los casos, como muestra el índice DTR. Por otro lado, el índice SU25 muestra resultados diversos, con una disminución significativa en Arica de casi 9 días por década, un aumento de más de 6 en Iquique, una nueva disminución de 1,5 en Calama, y sin

Tabla 2: Resultados del análisis de tendencias de las temperaturas medias mensuales (1966-2015). Los valores significativos (90%) aparecen en negrita. La tendencia aparece en °C/década.

| Observ. | ENE. | FEB. | MAR. | ABR. | MAY. | JUN. | JUL. | AGO. | SEP. | OCT. | NOV. | DEC. |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Arica | +0,14 | +0,15 | +0,09 | +0,19 | +0,17 | +0,14 | +0,13 | +0,13 | +0,07 | +0,09 | +0,10 | +0,14 |
| Iquique | -0,10 | +0,00 | -0,17 | -0,25 | -0,16 | -0,06 | -0,11 | -0,11 | -0,17 | -0,29 | -0,20 | -0,18 |
| Calama | +0,05 | +0,00 | +0,05 | +0,00 | +0,00 | +0,05 | +0,00 | +0,05 | +0,00 | +0,00 | +0,00 | -0,09 |
| Antofagasta | +0,12 | +0,21 | +0,17 | +0,05 | +0,03 | +0,08 | +0,00 | +0,16 | +0,18 | +0,13 | +0,05 | +0,00 |

Fuente: Elaboración propia.

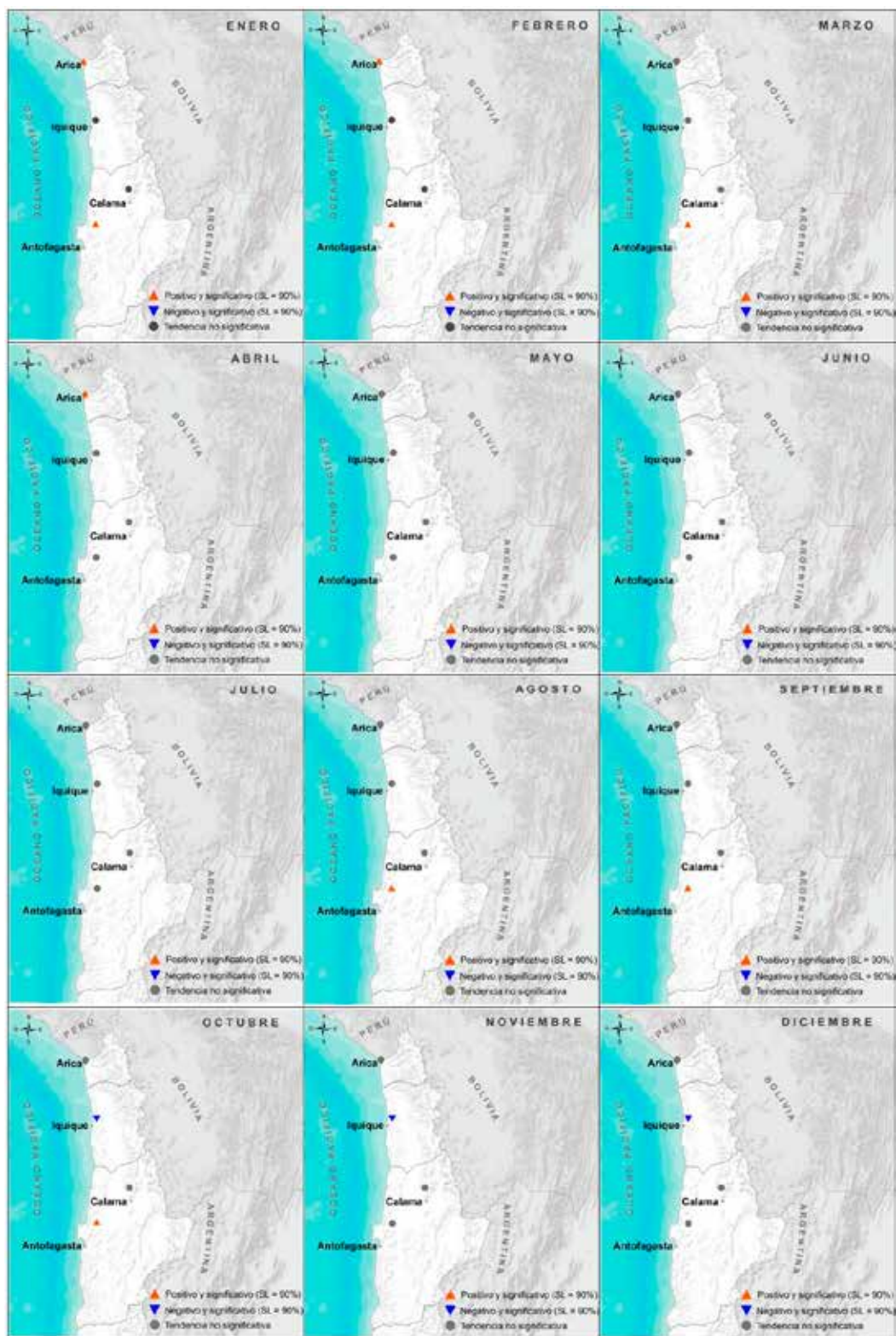


Figura 1. Distribución espacial de las tendencias de las medias mensuales (1966-2015) para los diferentes observatorios.
Fuente: Elaboración propia.

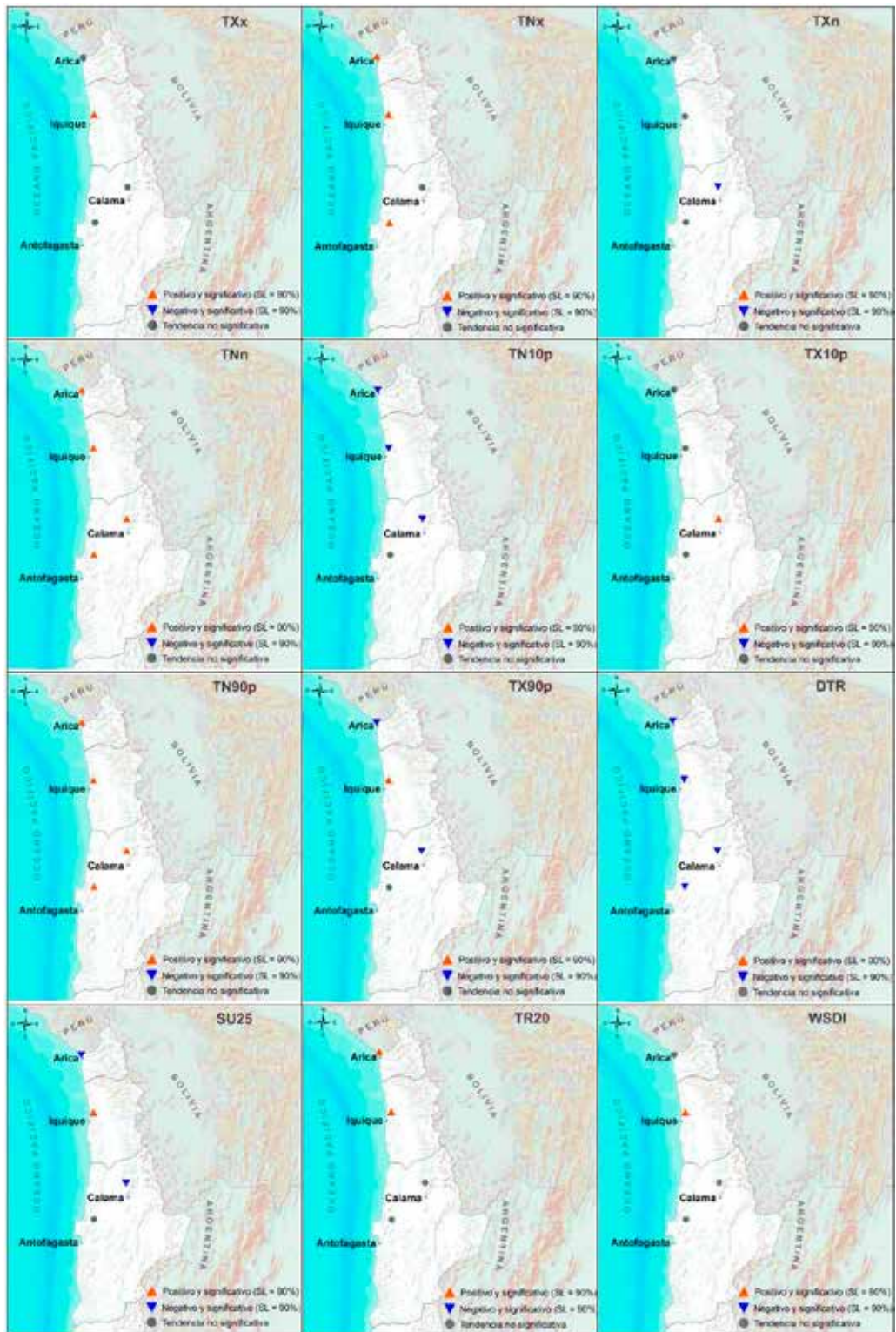


Figura 2. Distribución espacial de las tendencias de los índices de temperaturas diarias extremas (1966-2015) para los diferentes observatorios.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados del análisis de tendencias de los índices de temperaturas diarias extremas (1966-2015). Los valores significativos (90%) aparecen en negrita. La tendencia aparece en °C/década o días/década, según índice (ver Tabla 1).

| Observatorio | TXx | TNx | TXn | TNn | TN10p | TX10p |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Arica | +0,04 | +0,29 | +0,00 | +0,47 | -8,94 | +4,29 |
| Iquique | +0,35 | +0,38 | -0,08 | +0,38 | -3,33 | +3,14 |
| Calama | -0,14 | +0,12 | -0,15 | +0,26 | -5,00 | +5,00 |
| Antofagasta | +0,18 | +0,29 | +0,13 | +0,23 | -1,67 | +0,35 |
| Observatorio | TN90p | TX90p | DTR | SU25 | TR20 | WSDI |
| Arica | +7,67 | -6,56 | -0,51 | -8,75 | +8,00 | +0,00 |
| Iquique | +7,68 | +5,00 | -0,17 | +6,32 | +1,67 | +0,34 |
| Calama | +3,91 | -3,02 | -0,34 | -1,51 | +0,00 | +0,00 |
| Antofagasta | +4,69 | -0,26 | -0,14 | +0,00 | +0,00 | +0,00 |

Fuente: Elaboración propia.

tendencia en Antofagasta. Las noches tropicales, representadas por el índice TR20, han aumentado significativamente en Arica y en Iquique, 8 y 1,67 días/década, respectivamente. Más al sur, no hay cambios significativos. Las rachas de días cálidos, WSDI, únicamente aumentan en la ciudad de Iquique, y lo hacen de manera suave (0,34 días/década).

Discusión y Conclusiones

Se registra que las temperaturas medias mensuales han experimentado un ascenso en los observatorios de la costa (Arica y Antofagasta, pero no en Iquique), no así en el del interior, coincidiendo parcialmente con las proyecciones del AR5 (IPCC 2013). Estos resultados son consistentes con trabajos llevados a cabo a escala regional en otras áreas de estudio, como los desarrollados por Del Río *et al.* (2012), Pellicone *et al.* (2014) y Caloiero *et al.* (2015), así como el trabajo de Hughes (2003) para el caso de Australia desde 1951. El observatorio de Calama, en el interior, no presenta tendencias significativas en ninguna media mensual, lo que evidenciaría el Global Warming Hiatus en las regiones de montaña, coincidiendo con los resultados de Bennett *et al.* (2016), pero no plenamente con Vuille *et al.* (2015), correspondiéndose con el evidente descenso de las temperaturas medias de octubre, noviembre y diciembre en Iquique. Estos resultados son consistentes con estudios anteriores. De hecho, aunque en algunos trabajos se haya detectado un descenso significativo en el índice DTR (como en el presente) por un aumento relativamente raro de las temperaturas mínimas más que de las máximas, otros estudios (Guan *et al.* 2015) evidencian mayores aumentos de TXn y TXx que de TNn y TNx. En la misma línea, estos

descubrimientos concuerdan parcialmente con otros previos obtenidos para la misma región, aun pese a considerar diferentes períodos de observación. Por ejemplo, los resultados obtenidos no coinciden completamente con los que presentan Falvey y Garreaud (2009), ya que los índices de extremos muestran un claro aumento de las temperaturas mínimas, y únicamente se evidencia una disminución de las temperaturas medias para octubre en el observatorio de Iquique. Al igual que ocurre en otro trabajo que aplica la misma metodología, (Caloiero 2016), el índice SU25 presenta tendencias tanto positivas como negativas, dependiendo del observatorio considerado, y el índice TR20 muestra un aumento significativo en los observatorios de Arica e Iquique, mientras que en Antofagasta y Calama no presenta cambios significativos.

En definitiva, las principales evidencias del aumento de las temperaturas en el Norte Grande chileno quedarían registradas en el comportamiento de las temperaturas mínimas, habiendo registrado un aumento significativo en el período estudiado, mientras que las temperaturas máximas no han aumentado de forma generalizada.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) por la cesión de los datos. También el apoyo institucional del Convenio de Desempeño UTA-MINEDUC, del proyecto UTA-Mayor 5744-16, de los proyectos FONDECYT 11130629, 1150701 y 11160059, y del Grupo de Climatología (2014SGR300, Generalitat de Catalunya). Asimismo, también se agradece a los evaluadores del presente artículo por sus observaciones.

Referencias Citadas

- Alexander, L.V., *et al.*
2006 Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research* 111:D0510.
- Bennett, M., New, M., Marino, J. y Sillero-Zubiri C.
2016 Climate complexity in the Central Andes: A study case on empirically-based local variations in the dry Puna. *Journal of Arid Environments* 128:40-49.
- Bradley, R.S., Keimig, F.T., Diaz, H.F. y Hardy, D.R.
2009 Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters* 36: L17701, doi: 10.1029/2009GL037712.
- Caloiero, T.
2015 Analysis of rainfall trend in New Zealand. *Environmental Earth Sciences* 73:6297-6310.
- Caloiero, T.
2016 Trend of monthly and daily data extreme temperature during 1951-2012 in New Zealand. *Theoretical and Applied Climatology* doi: 10.1007/s00704-016-1764-3.
- Cowtan, K. y Way, R.G.
2014 Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 140:1935-1944.
- Del Río, S., Cano-Ortiz, A., Herrero, L. y Penas, A.P.
2012 Recent trends in mean maximum and minimum air temperatures over Spain (1961-2006). *Theoretical and Applied Climatology* 109:605-626.
- England, M.H., *et al.*
2014 Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change* 4: 222-227.
- Falvey, M. y Garreaud, R.D.
2009 Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research* 114:D04102.
- Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A.M.G. y Peterson, T.
2002 Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19:193-212.
- Gabaldón-Leal, C., Ruiz-Ramos, M., de la Rosa, R., León, L., Belaj, A., Rodríguez, A., Santos, C., Lorite, I.J.
2017 Impact of changes in mean and extreme temperatures caused by climate change on olive flowering in southern Spain. *International Journal of Climatology* doi: 10.1002/joc.5048
- Guan, Y., Zhang, X., Zheng, F. y Wang, B.
2015 Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China. *Global and Planetary Change* 124:79-94.
- Guemas, V., Doblado-Reyes, F.J., Andreu-Burillo, I., Asif, M.
2013 Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade. *Nature Climate Change* 3: 649-653.
- Held, I.M., Soden, B.J.
2006 Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate* 19: 5686-5699
- Hughes, L.
2003 Climate change and Australia: trends, projections and impacts. *Austral Ecology* 28:423-443.
- Instituto Nacional de Estadísticas.
2010 *Compendio Estadístico*. Estadísticas Demográficas, Santiago.
- IPCC.
2013 Climatic Change 2013: *The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
- Katz, R.W. y Brown B.G.
1992 Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climate Change* 21:289-302.
- Keellings, D. y Waylen, P.
2012 The stochastic properties of high daily maximum temperatures applying crossing theory to modelling high-temperature event variables. *Theoretical and Applied Climatology* 108:579-590.
- Kendall, M.G.
1962 *Rank correlation methods*. Hafner Publishing Company, New York.
- Klein Tank, A.M.G., *et al.*
2002 Daily surface air temperature and precipitation dataset 1901-1999 for European Climate Assessment (ECA). *International Journal of Climatology* 22:1441-1453.
- Klein Tank, A.M.G., *et al.*
2006 Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and South Asia. *Journal of Geophysical Research* 111:D16105.
- Klein Tank, A.M.G. y Können, G.P.
2003 Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate* 16:3665-3680.
- Klok, E.J. y Tank, A.
2009 Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology* 29: 1182-1191.
- Kosaka, Y. y Xie, S.P.
2013 Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface-cooling. *Nature* 501:403-407.
- Labat, D., Goddérís, Y., Probst, J.L. y Guyot, J.L.
2004 Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27:631-642.
- Lavado Casimiro, W.S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J.C. y Guyot J.L.
2013 Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965–2007). *Hydrological Processes* 41:2944-2957.
- Liang, K., Bai, P., Li, J.J. y Liu, C.M.
2014 Variability of temperature extremes in the Yellow River Basin during 1961–2011. *Quaternary International* 336:52-64.
- Marengo, J.A., Pabón, J.D., Díaz, A., Rosas, G., Ávalos, G., Montealegre, E., Villacis, M., Solman, S. y Rojas, M.
2011 Climate change: Evidence and future scenarios for the Andean region. En *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*, editado por Sebastian K. Herzog, Rodney Martínez, Peter M. Jørgensen y Holm Tiessen, pp. 110-127. Inter-American Institute for Global Change Research SCOPE Publication, Sao Paulo, Brasil.

- Mann, H.B.
1945 Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245-259.
- Meehl, G.A., Arblaster, J.A., Fasullo, J.T., Hu, A. y Trenberth, K.E.
2011 Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface temperature hiatus periods. *Nature Climate Change* 1:360-364.
- Meehl, G.A., Teng, H. y Arblaster, J.A.
2014 Climate model simulations of the observed early-2000s hiatus of global warming. *Nature Climate Change* 4:898-902.
- Ministerio del Interior de Chile.
2015 Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015. Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos. Santiago.
- Otto, A., et al.
2013 Energy budget constraints on climate response. *Nature Geosciences* 6:415-416.
- Pellicone, G., Caloiero, T., Coletta, V. y Veltri, A.
2014 Phytoclimatic map of Calabria (southern Italy). *Journal of Maps* 10:109-113.
- Plummer, N., Salinger, M.J., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessy, K.J., Leighton, R.M., Trewin, B., Page, C.M. y Lough, J.M.
1999 Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. *Climate Change* 42:183-202.
- Poveda, G. y Pineda, K.
2009 Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010–2020 decade? *Advances in Geosciences* 22:107-116.
- Rabatel, A., et al.
2013 Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere* 7:81-102.
- Rosenblüth, B., Fuenzalida, H.A. y Aceituno, P.
1997 Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology* 17:67-85.
- Salinger, M.J.
1995 Southwest Pacific temperatures: trends in maximum and minimum temperatures. *Atmospheric Research* 37:87-99.
- Salinger, M.J. y Griffiths, G.M.
2001 Trends in New Zealand daily temperature and rainfall extremes. *International Journal of Climatology* 21:1437-1452.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B.G., Burns, P. y Portocarrero, C.
2013 Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *Cryosphere* 7:103-118.
- Santer, B.D., et al.
2014 Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. *Nature Geosciences* 7:185-189.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon M.J., Meseguer-Ruiz, O.
2017 Climatic Regionalisation of Continental Chile. *Journal of Maps* 13(2): 66-73.
- Schauwecker, S., et al.
2014 Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change* doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.05.005
- Schulz, N., Bosier, J.P. y Aceituno, P.
2012 Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology* 32(12):1803-1814.
- Seiler, C., Hutjes, R.W.A. y Kabat, P.
2013 Climate variability and trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52:1303-1317.
- Solomon, S., Daniel, J.S., Neely, R.R., Vernier, J.P., Dutton, E.G. y Thomason, L.W.
2011 The persistently variable "background" stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science* 333(6044):866-870.
- Skansi, M.M., et al.
2013 Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change* 100:295-307.
- Tian, J., Liu, J., Wang, J., Li, C., Nie, H., Yu, F.
2017 Tren analysis of temperature and precipitation extremes in major grain producing area of China. *International Journal of Climatology* doi: 10.1002/joc.4732
- Trenberth, K.E. y Fasullo J.T.
2013 An apparent hiatus in global warming?, *Earth's Future* 1:19-32.
- Vose, R.S., Easterling, D.R. y Gleason B.
2005 Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004. *Geophysical Research Letters* 32:L23822.
- Vuille, M. y Bradley, R.S.
2000 Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27:3885-3888.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M. y Keimig, F.
2003 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climate Change* 59(1-2):75-99.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G. y Bradley, R.S.
2008 Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth Science Reviews* 89:79-96.
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W.S. y Cáceres, B.
2015 Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120. doi: 10.1002/2015JD023126.
- Wang, Z., Jiang, Y., Wan, H., Yan, J., Zhang, X.
2017 Detection and Attribution of Changes in extreme Temperatures at Regional Scale. *Journal of Climate* doi: 10.1175/JCLI-D-15-0835.1
- Ye, L., Yang, G., Van Rans, t E. y Tang, H.
2013 Time-series modelling and prediction of global monthly absolute temperature for environmental decision making. *Advances in Atmospheric Sciences* 30:382-396.
- Zhai, P.M., Zhang, X.B., Wan, H. y Pan, X.H.
2005 Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate* 18:1096-1108.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B. y Zwiers, F.W.
2011 Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change* 2:851-870.