

CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIA DE LA ALTURA DE LA ISOTERMA CERO



Dirección Meteorológica de Chile
Sección Climatología
Oficina Cambio Climático

Volcán Osorno, 2020



Cordillera de los Andes, fotografiada desde el observatorio El Tololo, agosto 2019.

CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIA DE LA ALTURA DE LA ISOTERMA CERO

ELABORADO POR: RICARDO VÁSQUEZ YAÑEZ

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE

SECCIÓN CLIMATOLOGÍA

OFICINA CAMBIO CLIMÁTICO

DICIEMBRE, 2020

Índice

INTRODUCCIÓN.....	3
METODOLOGÍA.....	4
Fuente de datos de radiosondas y estaciones meteorológicas.	4
Estimación de la altura de la isoterma cero.	4
Climatología y tendencias	5
CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIA DE LA ISOTERMA CERO.....	7
ZONA NORTE	7
Comportamiento de la isoterma cero	7
Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación	10
ZONA CENTRAL.....	15
Comportamiento de la isoterma cero	15
Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación	18
ZONA SUR.....	21
Comportamiento de la isoterma cero	21
Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación	24
ZONA AUSTRAL.....	27
Comportamiento de la isoterma cero	27
Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación	30
CONCLUSIÓN	34
REFERENCIAS.....	36

INTRODUCCIÓN

El principal desencadenante de los deslizamientos de tierra entre las regiones de Antofagasta y Aysén es la precipitación, donde en términos porcentuales de casos en la Región de Aysén alcanza el 84.6%, seguido por la Región del Maule con 80.3% y la Región de la Araucanía con 76.4% (Espinosa G. y otros, 1985). Un aspecto importante de la precipitación asociada a estos deslizamientos es la temperatura a la cual se desarrolla. En un ambiente cálido, cae precipitación líquida a mayor altura, aumentando así la carga pluvial sobre las cuencas de ríos, pudiendo generar crecidas, aludes o aluviones con sus respectivos impactos en las personas y bienes.

Un ejemplo de ello es el aluvión ocurrido en la ciudad de Santiago el 3 de mayo de 1993, cuando bajo condiciones anormalmente cálidas para la fecha un evento de precipitación desencadenó un escurrimiento de agua y barro a través de la Quebrada de Macul y Quebrada de Ramón dejando 23 víctimas fatales y millonarias pérdidas (Garreaud, 2013). Un evento más reciente fue el ocurrido en la Región de Atacama en marzo de 2015. Producto de una baja segregada ubicada en torno a los 25°S y con un contenido de agua precipitable anormalmente alto (Barret, 2016), se provocó una intensa precipitación entre los días 24 y 25 de marzo, que generaron una serie de desbordes e inundaciones dejando 31 muertos, 16 desaparecidos y 2071 viviendas destruidas (ONEMI, 2015).

Una forma de evaluar la temperatura a la cual se desarrolla un evento de precipitación es utilizando la altura de la isoterma cero (iso 0°C) que corresponde al nivel donde la precipitación cambia de fase líquida a sólida (agua-nieve), lo cual se vuelve relevante debido a la abrupta orografía que presenta el país.

En un estudio realizado por Carrasco (2008), encontraron que la altura de la isoterma cero está aumentando a razón de 42 m/dec en Antofagasta, 19 m/dec en Santo Domingo (Quintero) y 2 m/dec en Puerto Montt para el período 1978-2006. Además, encontraron un aumento de 7 m/dec en Punta Arenas para el período 1975-2006. Estas tendencias se enmarcan dentro de lo observado en la zona norte y centro de Chile, donde se ha visto un importante aumento de la temperatura del aire en los valles y cordillera (Vuille, 2015 y Falvey, 2009), por lo que la precipitación estaría ocurriendo en un ambiente cada vez más cálido.

Es por ello que se hace relevante contar con nuevas estimaciones y evaluaciones del comportamiento de la isoterma cero principalmente en los días con precipitación. En este trabajo se consideran los datos diarios de isoterma cero y precipitación, con el fin de determinar umbrales para la evaluación del riesgo asociado a la precipitación y además evaluar la tendencia que se ha observado durante los últimos años.

METODOLOGÍA

Fuente de datos de radiosondas y estaciones meteorológicas.

Se utilizaron los datos diarios de radiosondas de las 12:00 UTC obtenidos desde el sitio web de la Universidad de Wyoming y desde los archivos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) para las estaciones de Antofagasta (1973-2019), Quintero (enero de 1976 y agosto 1999), la cual posteriormente fue trasladada a Santo Domingo (septiembre de 1999 hasta diciembre de 2018), Puerto Montt (1975-2019) y Punta Arenas (1977-2019).

Los datos de precipitación fueron obtenidos desde diferentes redes de estaciones pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Dirección General de Aguas (DGA), Codelco Andina e Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) a escala diaria.

Estimación de la altura de la isoterma cero.

Se realizó un algoritmo de búsqueda de altura de la isoterma cero en los perfiles de temperatura de radiosondas, donde primeramente se encontraron todos los valores de temperatura igual a 0°C en las observaciones y se extrajo su altura de manera directa. Si no hay temperatura igual a 0°C, el programa busca el valor más cercano a cero, positivo y negativo (cambio de signo), para estimar la altura de la isoterma cero siguiendo el método utilizado por Zhang (2014), definido como:

$$H_0 = T_{down} \frac{H_{down} - H_{up}}{T_{up} - T_{down}} + H_{down} \quad (1)$$

Donde, H_0 representa la altura de la isoterma 0°C en metros. H_{up} y H_{down} representan las alturas geopotenciales de los dos niveles de presión estándar cercanos a la isoterma 0°C. T_{up} y T_{down} representan las temperaturas del aire de los dos niveles de presión estándar cercanos a la isoterma 0°C.

Si se encuentra más de un valor igual a cero o más de un cambio de signo el algoritmo arroja un error para realizar una inspección visual y descartar errores en los datos, luego se escogió la altura más baja, siempre y cuando los valores positivos no vuelvan a superar 1°C.

Para efectuar el control de calidad, en primera instancia se evaluó mediante umbrales basados en percentiles (P95% y P05%) de los datos obtenidos de la altura de la isoterma de 0°C. Aquellos valores que se presentaron fuera de este rango de percentiles fueron chequeados mediante inspección visual de los radiosondas en papel o digital y fueron corregidos o eliminados en caso de ameritarlo.

Dado que el punto de lanzamiento del radiosonda de la zona central se cambió desde Quintero a Santo Domingo en el año 1999, se evaluó homogeneidad de la serie mediante el método de (Marc Lavielle, 2006) el cual busca cambios significativos en la media de los promedios mensuales de la serie. El algoritmo arrojó como punto de cambio junio de 1999, fecha coincidente con el año de cambio en la ubicación de los lanzamientos del radiosonda desde Quintero a Santo Domingo (figura 1, línea verde), por lo que la serie fue corregida desde el mes de junio de 1999 hacia atrás. La corrección se realizó restando a cada dato diario, el valor de la diferencia de los promedios mensuales entre los datos antes de la fecha del cambio (1979-1998) y después de éste (2000-2018).

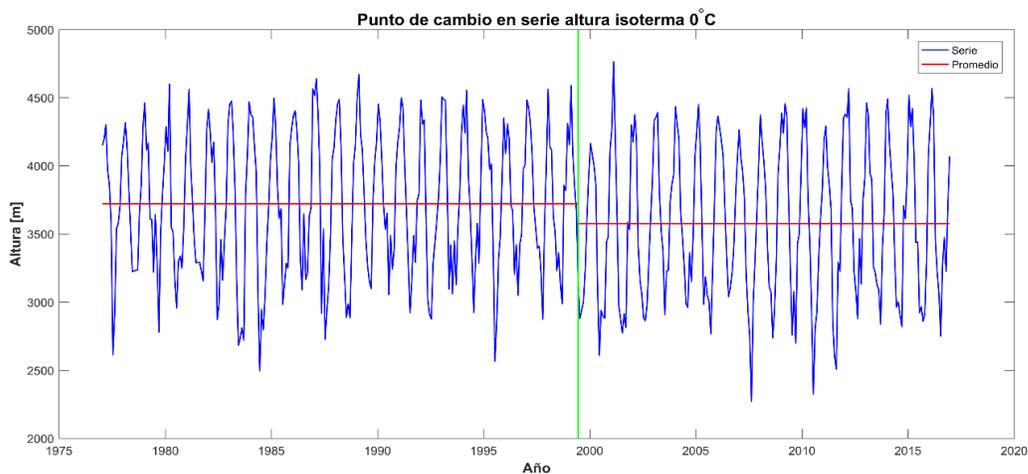


Figura 1. Serie mensual de altura de la isoterma cero (azul) de Quintero y Santo Domingo. La línea roja corresponde al promedio de la serie antes y después del punto de cambio, que se indica con línea verde.

De la misma forma, se aplicó el test de homogeneidad SNHT (Alexandersson, 1997) a las series anuales de temperatura del aire de los niveles 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 y 200 hPa de la estación Santo Domingo para evaluar el salto asociado al cambio de estación de 1999. Se corrigieron las series para los cuales el salto fue significativo a un $p < 0.05$ de significancia.

Climatología y tendencias

En la climatología se utilizó el período completo disponible en cada estación de sondeo. Para obtener los datos de percentiles a cada mes se le ajustó una distribución de probabilidad utilizando la librería “Propagate” de R, el cual ajusta 32 distribuciones y determina el mejor ajuste mediante el “Criterio de Información Bayesiano” (BIC) que es una relación entre la verosimilitud (L), el número de parámetros (k) de la distribución y tamaño de la muestra (n), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{BIC} = -2 \cdot \ln(L) + k \ln(n)$$

Finalmente se selecciona la distribución que tiene el menor valor de BIC (ejemplo, figura 2).

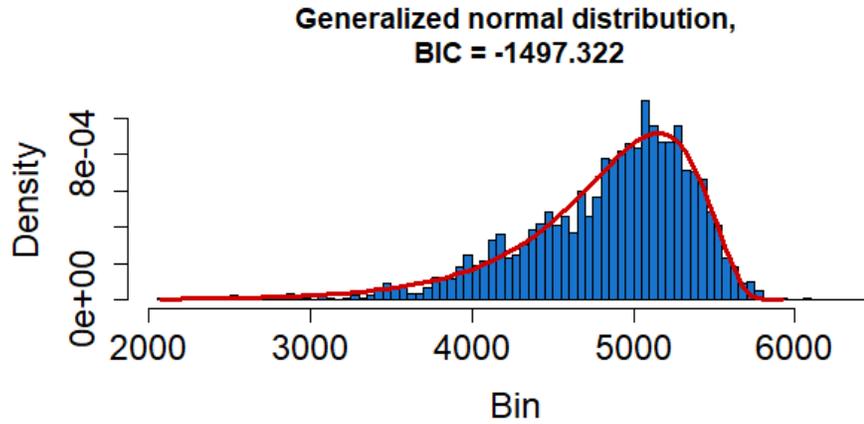


Figura 2. Ajuste de distribución teórica para la altura de la isoterma cero en días con precipitación (> 1mm), para la zona norte. El histograma representa las observaciones y la línea roja el ajuste de la distribución mencionada en el título del gráfico.

La significancia en las tendencias se evaluó utilizando el test de Mann_Kendall (Libiseller, C. and Grimvall, A., 2002), con un nivel de significancia $p < 0.05$.

CLIMATOLOGÍA Y TENDENCIA DE LA ISOTERMA CERO

ZONA NORTE

En la zona norte el lugar de lanzamiento del radiosonda está ubicado en el aeropuerto Andrés Sabella de la ciudad de Antofagasta (figura 7), a 112 m sobre el nivel del mar.

Comportamiento de la Isotherma cero

La isoterma 0°C tiene un promedio de 4687 m [4679,4694], presenta un marcado ciclo estacional con valores máximos en el mes de enero (5060 m en promedio) y mínimos en julio (4296 m) como se observa en la Tabla 1. Respecto a los extremos, el percentil 10% (P10) se observa sobre los 4000 m la mayor parte del año salvo entre los meses de junio y septiembre donde bordea los 3900 m, indicando que eventos bajo este nivel son raros de observar en la zona. Por otro lado, el percentil 90% (P90) permanece sobre los 5000 m a excepción entre los meses de junio y septiembre donde llega hasta 4858 en julio (Tabla 1).

TABLA 1. Altura Isotherma cero Antofagasta.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	5060	5023	5009	4798	4522	4388	4296	4398	4438	4608	4774	4953
P10	4552	4525	4539	4309	4041	3904	3832	3959	3925	4117	4287	4469
P90	5487	5468	5476	5240	5011	4926	4858	4924	4966	5015	5228	5391

No se observan mayores cambios en la dispersión en el transcurso de los meses expresado por el tamaño de las cajas y línea negra de la figura 3, reflejando la marcada estabilidad de la zona, aunque, se observa una mayor frecuencia de valores atípicos bajos (puntos rojos figura 3) principalmente en invierno asociados al ingreso de masas de aire frío, situándose el mínimo bajo los 2000 m, mientras que los valores más altos observados superan los 6000 m de altura.

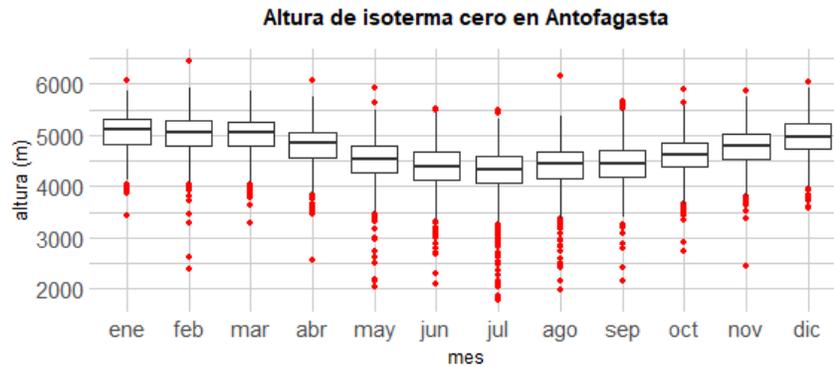


Figura 3. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero. Los bordes (superior e inferior) de la caja representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo calculados como: $max = p75 + 1.5 \cdot IQR$ y $miin = p25 - 1.5 \cdot IQR$, con $IQR = p75 - p25$. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites.

La tendencia presenta un sostenido aumento de 40 m/dec, siendo el año 2019 el que alcanzó el valor más alto en promedio con 4843 m (figura 4). A escala estacional son la primavera e invierno las estaciones que presentan el mayor aumento en la isoterma cero con 52 y 50 m/dec respectivamente, mientras que, en verano la tendencia alcanza 44 m/dec y en otoño 24 m/dec. Todas las tendencias fueron significativas con una significancia de 0.05.

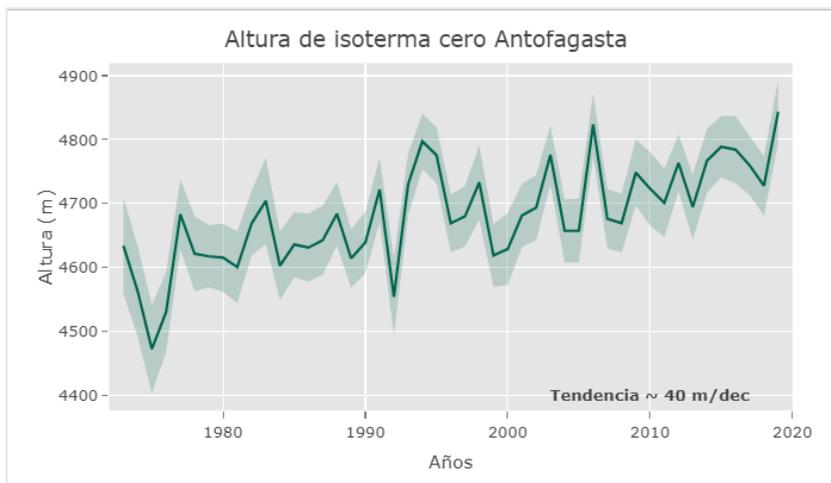


Figura 4. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea). La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

Si bien la isoterma cero muestra un sostenido aumento, cabe preguntarse si este se produce en toda la columna de aire o sólo en algún nivel. Esto se observa en la figura 5 que muestra el perfil vertical por década, y además la tendencia asociada a la temperatura en cada nivel analizado.

En general se observan tendencias positivas y significativas (puntos rojos, figura 5) entre 850 hPa y 300 hPa, razón que explica el ascenso de la isoterma cero que se ubica generalmente entre los 700 y 500 hPa, mientras que, en 1000 hPa la tendencia es positiva pero no significativa con $0.08 \text{ }^\circ\text{C/dec}$, algo parecido ocurre en 200 hPa con $0.06 \text{ }^\circ\text{C/dec}$. Esto concuerda con lo observado en las estaciones de superficie de la zona costera que muestran tendencias débiles de temperatura media (Garreaud o Falvey 2007).

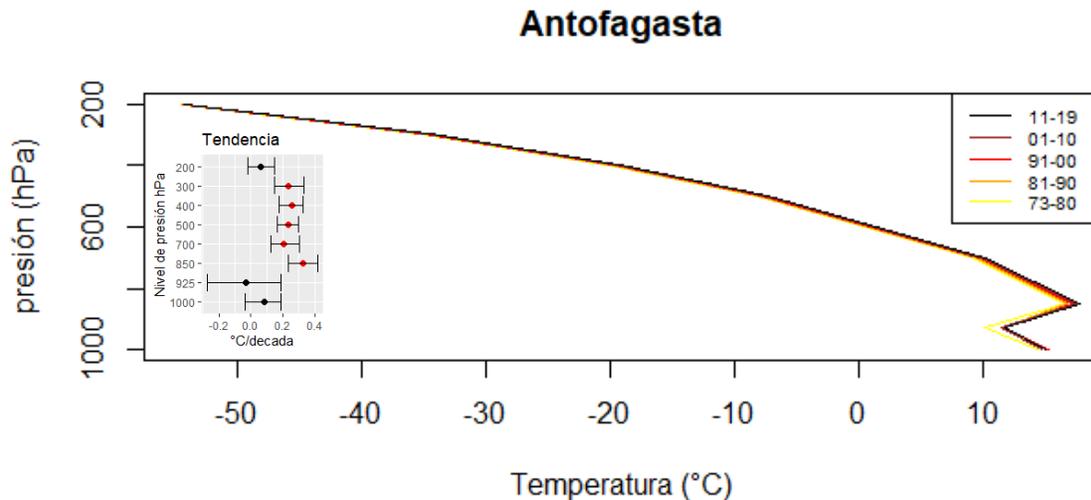


Figura 5. Perfil vertical (hPa) de temperatura período 1973-2019. Recuadro interior muestra las tendencias ($^\circ\text{C/dec}$) y su intervalo de confianza al 95% para los niveles de presión 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 y 200 hPa. Los colores rojos indican tendencia significativa ($p < 0.05$). Para el nivel de presión 925 hPa se utilizó el período 1994-2019, por falta de datos.

Una característica típica de la zona norte es la inversión térmica, que es una delgada capa de la atmósfera donde la temperatura aumenta con la altura (figura 5), la cual se observa de manera constante y restringe la altura de la capa límite marina y el desarrollo de nubosidad a niveles bajos. Esta tiene un promedio de 5.9°C , calculado entre los niveles de 850 y 925 hPa, presentando una tendencia positiva de $0.3 \text{ }^\circ\text{C/dec}$. Esto se explica en parte por un aumento en la temperatura en 850 hPa, nivel que presenta la tendencia más alta con 0.3°C/dec y una disminución en el nivel de 925 hPa de $-0.03 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ (figura 5, cuadro interior).

Para evaluar los eventos extremos de isoterma cero, se contaron los días sobre el percentil 90% y bajo el percentil 10% para cada año. Se observa en la figura 6 que los días sobre p90% están aumentando (línea roja) alcanzando un máximo en el año 2019 con 80 días. La tendencia tiene un valor de 8 días/dec, siendo estadísticamente significativa. Respecto a los días con isoterma bajo el p10%, el año 2019 completa 8 años consecutivos con valores bajo la media (línea negra) llegando, además, a un valor mínimo de 15 días al igual que en 2006. Por otro lado, se encontró una

disminución significativa de -3 días/dec en el período de estudio, siendo a partir del año 2011 donde observa con mayor notoriedad.

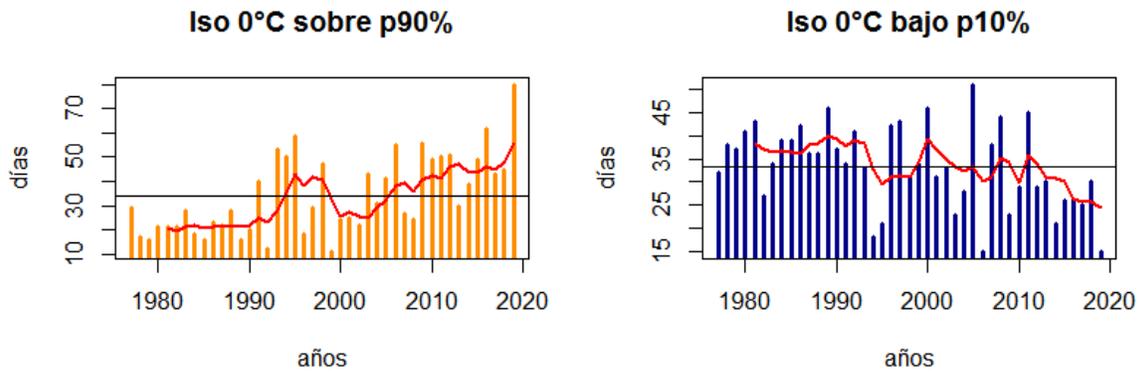


Figura 6. Días con isoterma cero sobre el percentil 90% (izquierda) y bajo percentil 10% (derecha). La línea negra muestra el promedio (1977-2019) y la línea roja es el promedio móvil de 5 años.

Comportamiento de la Isotherma cero en días con precipitación

Para evaluar la isoterma cero en días con precipitación (>1mm), se seleccionaron 23 estaciones con datos de precipitación, como se muestra en la figura 7, ubicadas sobre los 800 m de altura y hasta 300 km de distancia de Antofagasta, esto debido a que las precipitaciones más importantes ocurren en período estival y principalmente en sectores cordilleranos.

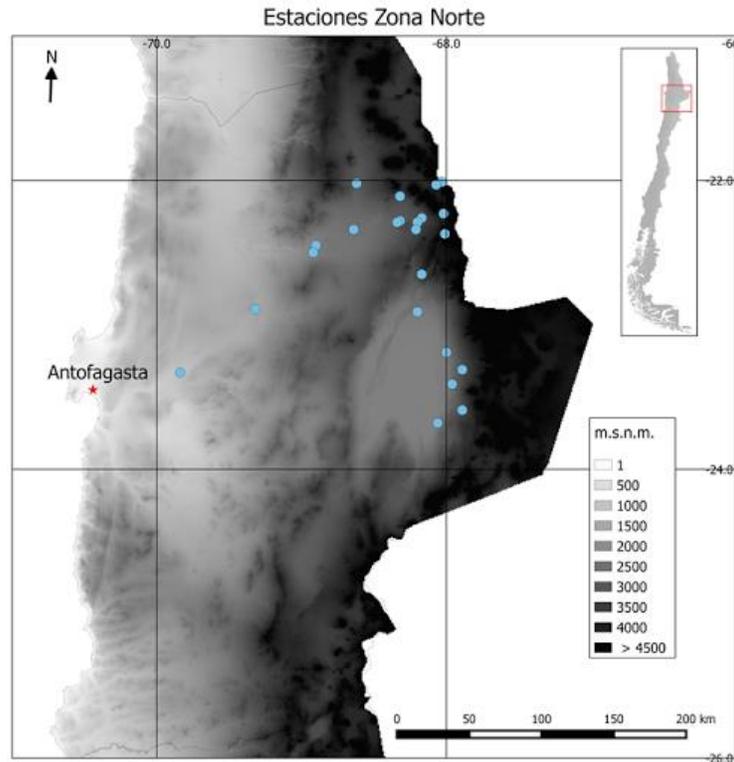


Figura 7. Ubicación de punto de lanzamiento de radiosonda (rojo) y estaciones de precipitación (celeste) en la zona norte.

Se puede observar que la iso 0°C se ubica con mayor frecuencia entre los 4000 y 5000 m durante los días de precipitación (figura 8), incluyendo los eventos que precipita gran cantidad de agua. Hay casos extremos en que la iso 0°C supera los 6000 m como el 22 de febrero de 2016, evento que dejó una serie de inconvenientes en la zona (Catastro Desastres Naturales Sernageomín). Por otro lado, las lluvias con isoterma baja tienden a ser débiles, probablemente asociadas al ingreso de frentes o masas de aire frío que alcanzan la zona en invierno, pero que llegan debilitadas y con poca humedad.

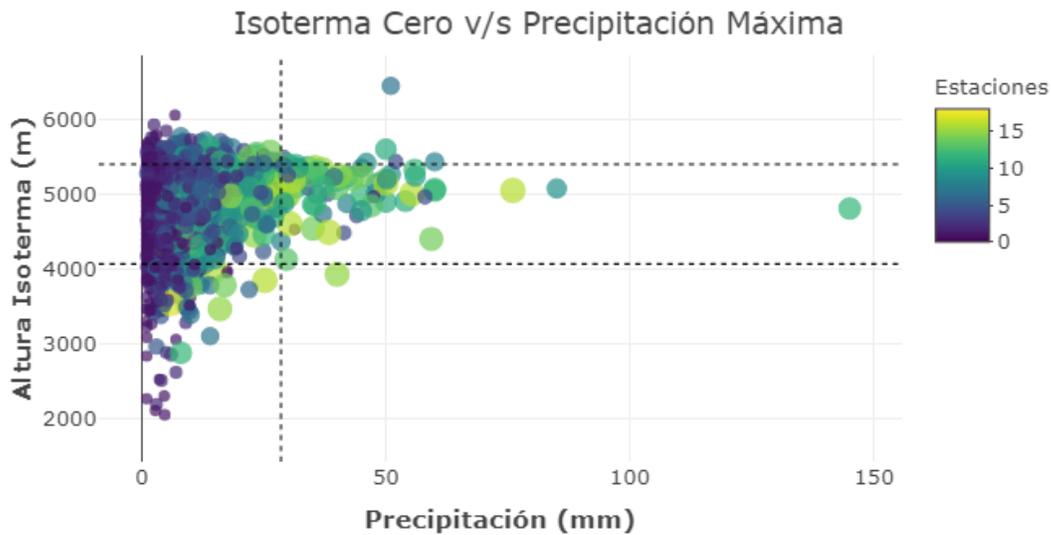


Figura 8. Gráfico superior se muestra altura de la isoterma cero en días con precipitación (eje y), versus la precipitación máxima para cada día de lluvia (eje x). En colores se muestra el número de estaciones que presentaron lluvia en ese día de manera simultánea. Las líneas horizontales representan los percentiles 10% y 90 % de la iso 0°C, mientras que la línea vertical muestra el p95% de la precipitación máxima diaria.

En la precipitación máxima hay un total de 170 días con lluvia sobre 1 mm y la isoterma se encuentra sobre el percentil 90 (5407 m) y en 90 ocasiones se ha superado el p95 de la lluvia (28.5 mm). Sólo en 6 oportunidades se superan ambos percentiles, que se considera como evento muy lluvioso y con isoterma alta, de los cuales 2 aparecen en el catastro de desastres del sernageomín (tabla 2).

año	mes	día	mm	iso 0°C
1995	1	29	46.0	5425
1997	2	28	52.0	5443
1999	2	11	29.1	5496
2000	1	23	50.0	5608
2016 *	2	22	51.0	6456
2017 *	1	21	60.0	5440

Tabla 2. Fechas de eventos extremos de precipitación e iso 0°C, en la zona norte. Se destaca con * los eventos que aparecen en el Catastro de Desastres Naturales de Sernageomín.

Por otro lado, al comparar los días con y sin precipitación, se puede observar que en verano no hay grandes cambios en la distribución de la altura de la isoterma cero, en cambio, en invierno tiende a bajar durante los días de lluvia. Esto es importante ya que un evento de lluvia al parecer no implica necesariamente un descenso de la altura de la isoterma cero, por lo que bastaría una precipitación intensa para generar complicaciones en términos de aumentos de caudal, inundaciones u otros fenómenos (figura 9).

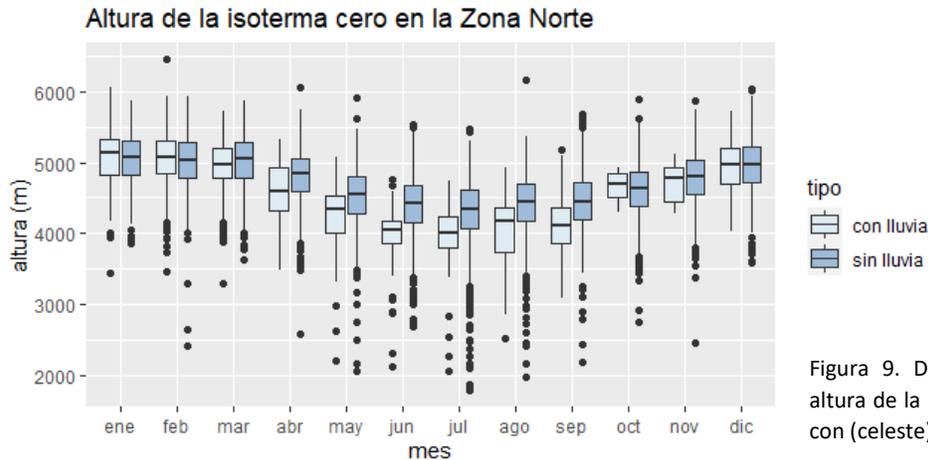


Figura 9. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero en los días con (celeste) y sin lluvia (azul).

Se podría pensar que la lejanía entre el punto de lanzamiento del radiosonda versus la ubicación de las estaciones de precipitación podría ser un factor que explique el comportamiento de la isoterma cero en días de lluvia. Para comprobar esto se realizó el mismo procedimiento pero en vez de considerar la iso 0°C en días de lluvia y sin lluvia se, usó la temperatura media ($t_{min}+t_{max}/2$) como se muestra en la figura 10. Se puede observar que al igual que con la isoterma cero, la temperatura no presenta mayores cambios en los meses de verano, independiente de la altura a la que se ubica la estación. En los meses de invierno la temperatura desciende en los días de lluvia al igual que lo hace la isoterma cero (figura 9 y 10).

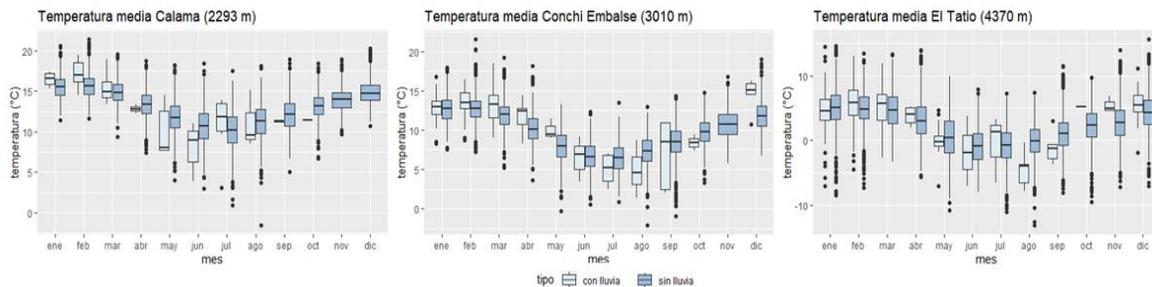


Figura 10. Similar al anterior, pero para la temperatura media en días con (celeste) y sin lluvias (azul), para tres diferentes estaciones meteorológicas de la zona norte.

Respecto a la tendencia de la iso 0°C en días con precipitación, el aumento es menor en comparación al de la figura 4, alcanzando 27 m/dec en el período 1973-2019 (figura 11).

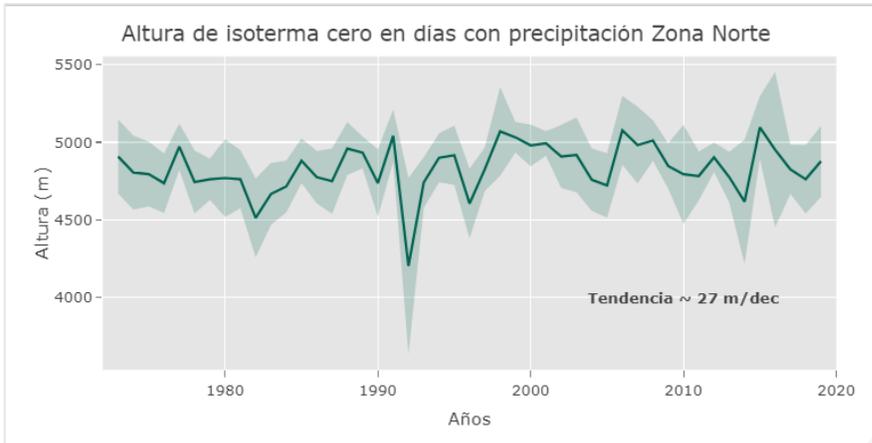


Figura 11. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea) en días con precipitación > 1mm. La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

ZONA CENTRAL

En la zona central el lanzamiento del radiosonda se realiza en el aeródromo de Santo Domingo en la Región de Valparaíso (figura 16), ubicado a 77 mts de altura sobre el nivel del mar.

Comportamiento de la isoterma cero

La isoterma cero en Santo Domingo tiene una altura promedio de 3588 m [3574,3601], donde los valores más altos se producen en período estival con un valor medio en enero de 4351 m y los valores más bajos en invierno, teniendo julio con 2913 m en promedio (Tabla 3). En términos de valores extremos el percentil 10% (P10) más bajo se observa en el mes de julio con 1704 m, sin embargo, el valor mínimo observado se produce en agosto (figura 12), mientras que el percentil 90% (P90) más alto ocurre en enero con 4883 m, pero el valor más alto se produce en febrero por sobre los 5500 m (figura 12).

TABLA 3. Altura Isotherma cero Santo Domingo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	4351	4323	4200	3810	3375	3091	2913	2917	3052	3328	3658	4071
P10	3868	3819	3668	3142	2399	2007	1704	1754	1951	2405	2960	3531
P90	4883	4865	4793	4625	4172	3948	3869	3872	3974	4071	4302	4679

La variabilidad de los valores aumenta durante los meses de invierno, reflejando un mayor contraste entre masas de aire que circulan por la zona central, sin embargo, se observan valores atípicos asociados a importantes descensos en la isoterma, entre los meses de octubre y mayo. Esto último, probablemente debido a la incursión de aire frío (vaguadas o bajas segregadas) hacia la zona central en meses normalmente cálidos y dominados por estabilidad atmosférica (figura 11).

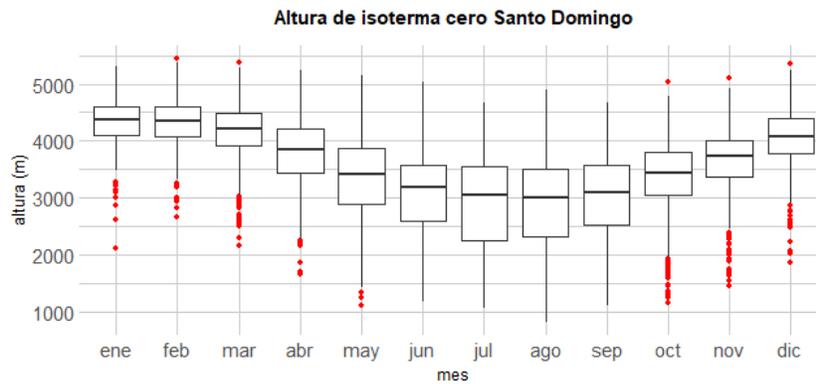


Figura 12. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero. Los bordes (superior e inferior) de la caja representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo calculados como: $\max = p75 + 1.5 \cdot IQR$ y $\min = p25 - 1.5 \cdot IQR$, con $IQR = p75 - p25$. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites.

La tendencia observada alcanza los 16 m/dec entre los años 1977-2019, siendo significativa al 95% de confianza (figura 13). El invierno y verano son las estaciones donde más se ha elevado la iso 0°C, con 19 m/dec y 15 m/dec respectivamente, sin embargo, no alcanzan significancia estadística. En cuanto al otoño el aumento es de 7 m/dec y en primavera de 6 m/dec.

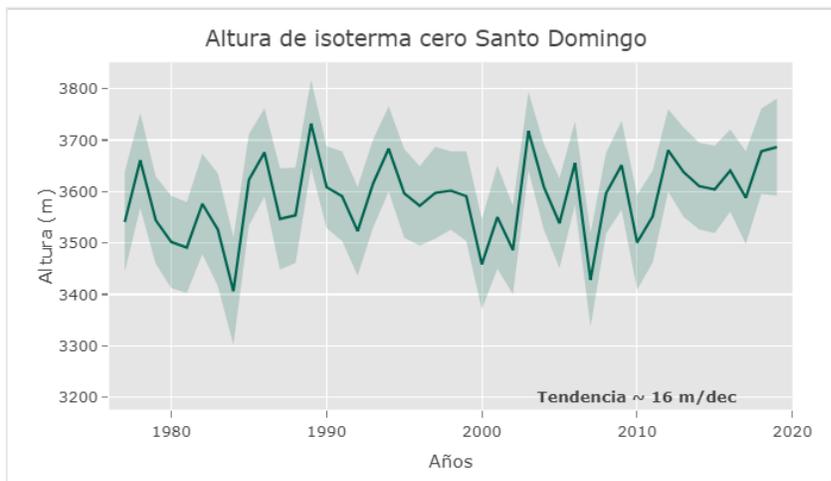


Figura 13. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea). La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

Esta elevación en la isoterma está asociada al aumento de la temperatura del aire desde los 850 hPa hacia arriba, como se muestra en la figura 14, sin embargo, las tendencias fueron débiles y sin significancia estadística. El único nivel en que se reduce la temperatura es 925 hPa que presenta una tendencia de $-0.08 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ (figura 14), aunque hay que considerar que el período de estimación es menor.

Santo Domingo

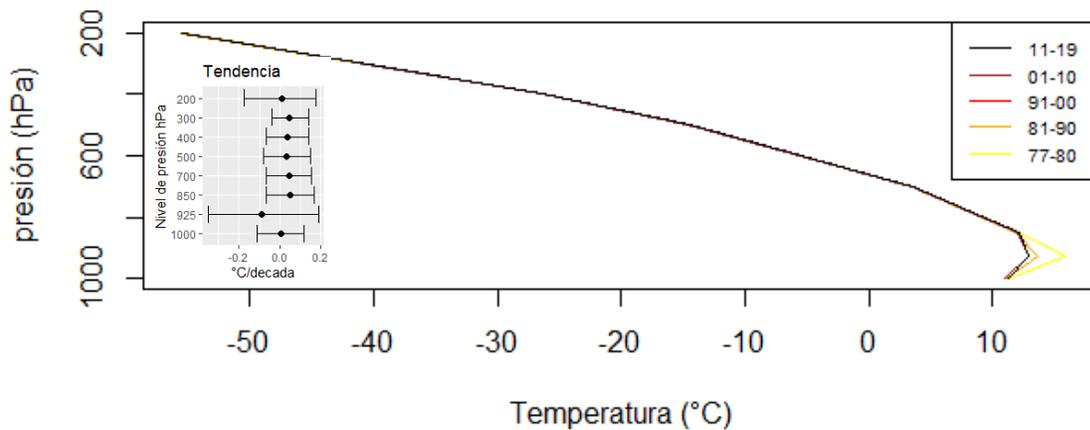


Figura 14. Perfil vertical (hPa) de temperatura período 1977-2019. Recuadro interior muestra las tendencias (°C/dec) y su intervalo de confianza al 95% para los niveles de presión 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 y 200 hPa. Los colores rojos indican tendencia significativa ($p < 0.05$).

Respecto a la inversión térmica esta se estimó entre los 1000 y 925 hPa dado que estos dos niveles presentaron la mayor diferencia de temperatura, que en promedio alcanza los 1.8°C con una tendencia de -0.23 °C/dec en el período 1994-2019, no siendo estadísticamente significativa.

En cuanto a los valores extremos, durante 33 días del año la iso 0°C supera el percentil 90% (línea negra) y se ha observado un aumento de estos días a razón de 2 días/dec siendo esta tendencia estadísticamente significativa. El año 2019 alcanzó el mayor número de días con 57 en total (figura 15), mientras que el año 1992 es el que tiene menos con 14 casos.

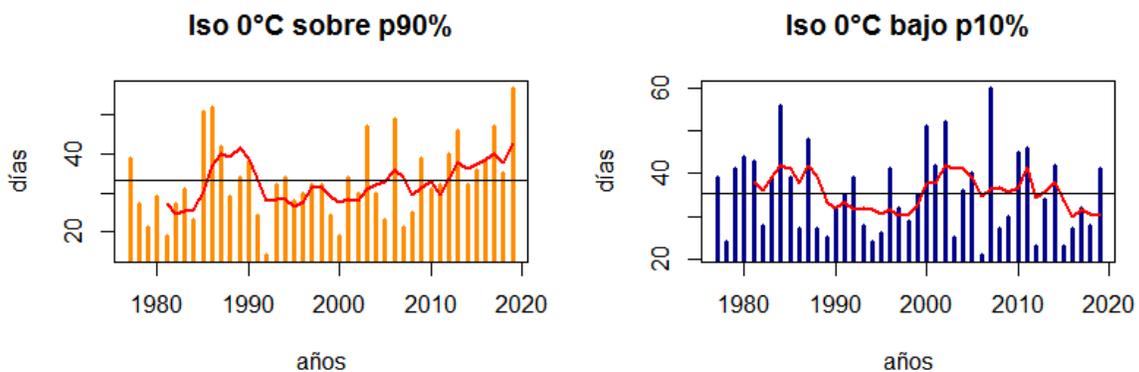


Figura 15. Días con isoterma cero sobre el percentil 90% (izquierda) y bajo percentil 10% (derecha). La línea negra muestra el promedio (1977-2019) y la línea roja es el promedio móvil de 5 años.

Las isothermas bajas presentan una tendencia de -0.7 días/dec, no alcanzando significancia estadística, sin embargo, el 2019 presentó valores por sobre el promedio. El año con más eventos fríos de isoterma fue el 2007 con 60 casos y el menor 2006 con 21 casos.

Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación

Para evaluar la isoterma cero en días con precipitación ($>1\text{mm}$), se seleccionaron 31 estaciones con datos de precipitación, como se muestra en la figura 16, ubicadas sobre los 800 m de altura y hasta 200 km de distancia de la estación Santo Domingo, esto para capturar principalmente las precipitaciones en período estival que ocurren en sectores cordilleranos.

En días de lluvia la isoterma cero puede alcanzar desde niveles bajo los 1000 m a cerca 5000 m. Donde la mayor parte de los casos se produce con montos bajo los 50 mm de precipitación máxima y pocas estaciones con registro simultáneo (colores morado figura 17). A medida que aumenta el monto de precipitación máxima la altura de la isoterma se ubica entre los 2000 m a 3500 m y además se observan más estaciones con registro simultáneo de lluvia, reflejando el carácter regional de la precipitación en la zona central, donde la mayor parte de la lluvia está asociada a sistemas frontales (figura 17).

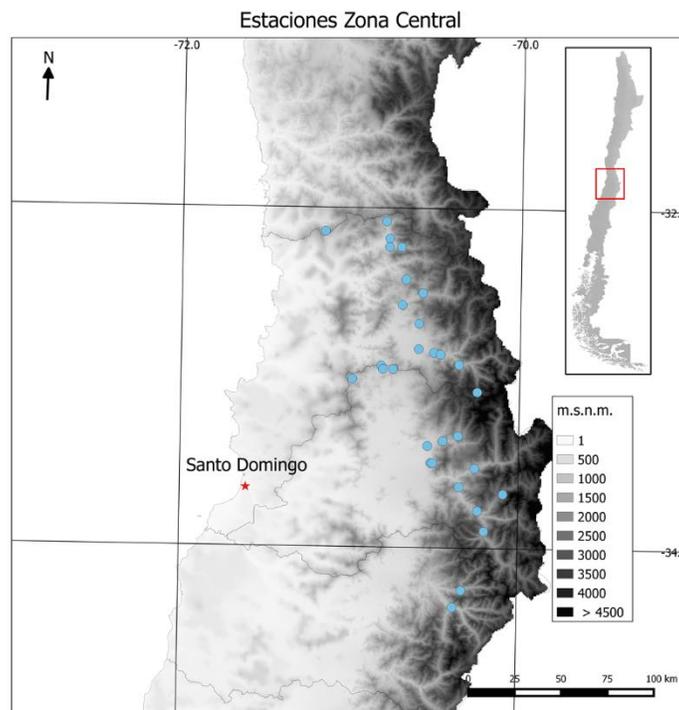


Figura 16. Ubicación de punto de lanzamiento de radiosonda (rojo) y estaciones de precipitación (celeste) en la zona central.

Respecto a los extremos, en 181 días de lluvia se supera el percentil 95% (79.5 mm) demarcado por la línea vertical en la figura 15. En cuanto a la isoterma 340 días de lluvia presentaron una altura sobre el percentil 90% (3954 m). Sólo tres días superan ambos percentiles (p90% isoterma y p95% de precipitación) los que se muestran en la tabla 4.

En cuanto a los días de lluvia con isoterma bajo el percentil 10% (1706 m), se cuentan 321 casos en total, donde el mínimo es de 810 m ocurrido el 9/8/2007 y precipitó un máximo de 13 mm.

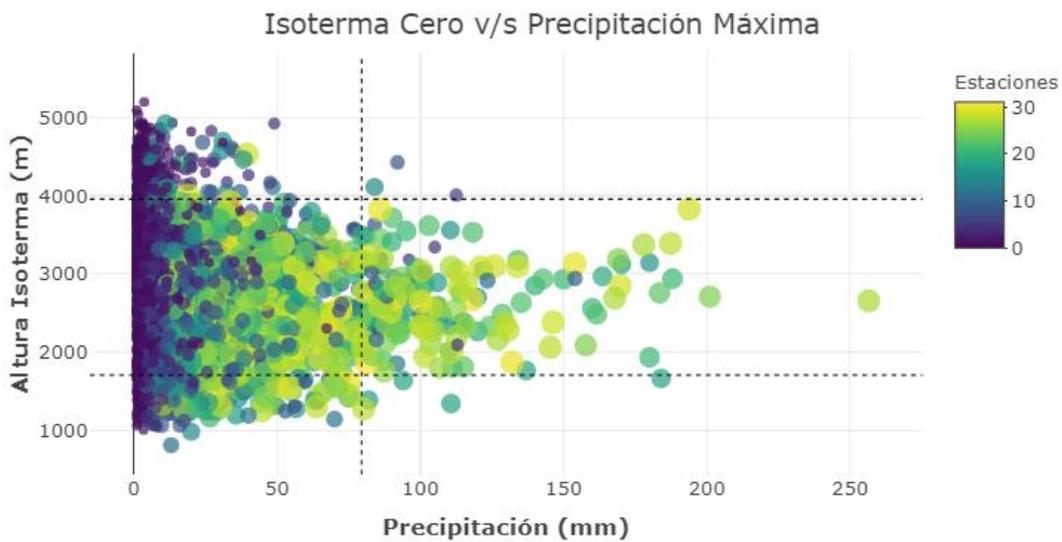


Figura 17. Gráfico superior se muestra altura de la isoterma cero en días con precipitación (eje y), versus la precipitación máxima para cada día de lluvia (eje x). En colores se muestra el número de estaciones que presentaron lluvia en ese día de manera simultánea. Las líneas horizontales representan los percentiles 10% y 90 % de la iso 0°C, mientras que la línea vertical muestra el p95% de la precipitación máxima diaria.

Se observa un descenso en la altura de la isoterma cero en días con lluvia, en comparación a los días secos, independiente de la estación del año. Además, en los meses de invierno los valores presentan una mayor dispersión, indicando que la fluctuación de la isoterma es mayor, pudiendo haber llovias con isoterma cercana tanto a los 1000 m como a los 4000 m (figura 18).

año	mes	día	mm	iso 0°C
1986	4	20	92	4425
2004	4	13	112.5	4006
2009	5	12	84	4111

Tabla 4. Fechas de eventos extremos de precipitación e iso 0°C, en la zona central.

Por el contrario, en los días secos la isoterma tiende a ser menos variable, indicando que los cambios son mayormente producidos por ingreso de masas de aire frío que acompañan los sistemas frontales.

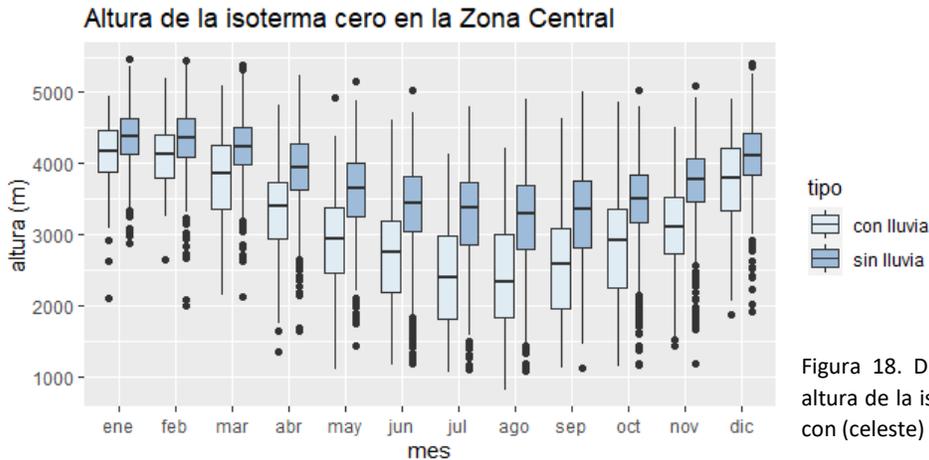


Figura 18. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero en los días con (celeste) y sin lluvia (azul).

La tendencia de la iso 0°C en días de lluvia alcanza un descenso de -42 m/dec, tendencia opuesta a lo observado en todos los días (figura 13). Esto está altamente influenciado por la observación del año 2019 donde el promedio anual alcanza un valor mínimo en el período analizado (figura 19).

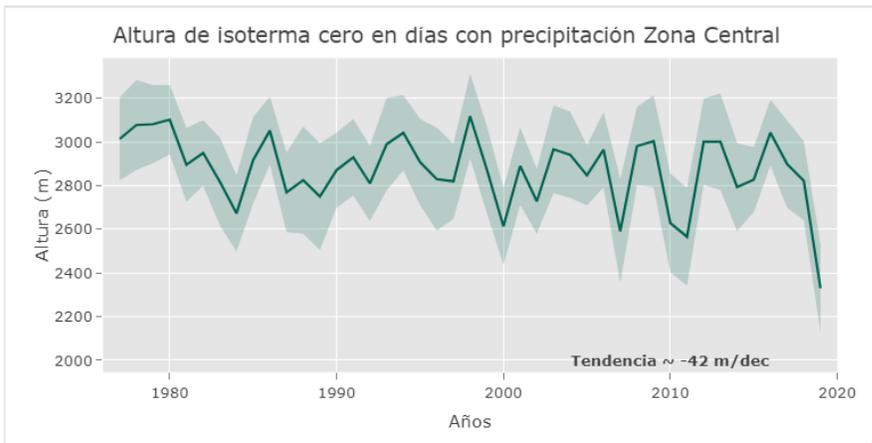


Figura 19. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea) en días con precipitación > 1mm. La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

ZONA SUR

En la zona sur el radiosonda se lanza desde el aeropuerto El Tepual en la ciudad de Puerto Montt, ubicado a una altura de 87 m sobre el nivel del mar.

Comportamiento de la isoterma cero

La isoterma cero en Puerto Montt presenta una altura promedio de 2328 m [2312,2344], siendo el mes de febrero el que alcanza el promedio más alto con 3281 m, mientras que, en agosto se observa el más bajo con 1647 m (tabla 5). Los percentiles muestran que el mes que tiene valores altos más extremos es abril donde el P90 alcanza los 4352 m, de hecho, en este mes se han observado alturas cercanas a los 5000 m como se muestra en la figura 18, mientras que el P10 más bajo se produce en julio con 853 m.

TABLA 5. Altura Isotherma cero Puerto Montt.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	3171	3281	3033	2569	2172	1782	1687	1647	1750	1899	2278	2743
P10	1673	2038	1695	1794	1242	948	853	882	930	1069	1208	1466
P90	4115	4254	4071	4352	3269	2797	2767	3085	2823	2948	3455	3854

En esta estación es común que la iso 0°C alcance la superficie como se muestra en el diagrama de cajas, donde entre los meses de julio y septiembre aparecen observaciones cero o cercanas a cero metros. En cambio, en verano los valores mínimos pueden acercarse a los 1000 m, al mismo tiempo que los máximos pueden rondar los 5000 m (figura 20). En términos de dispersión de los datos se puede observar que en los meses de verano hay una mayor variabilidad que en invierno, reflejando que en los meses estivales si bien sube la isoterma en promedio, igualmente se pueden observar valores bajos con frecuencia.

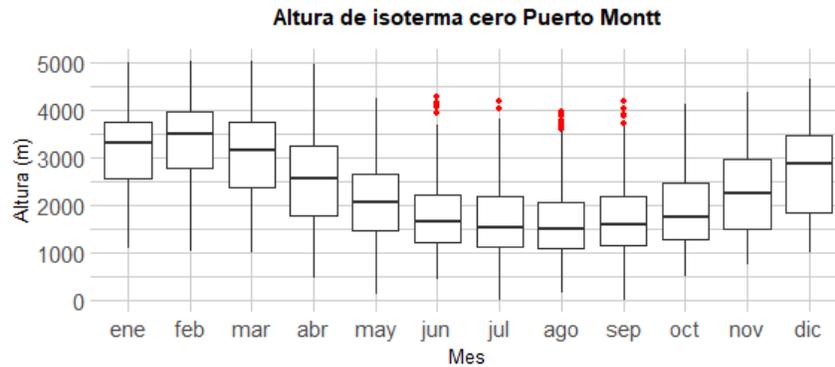


Figura 20. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero. Los bordes (superior e inferior) de la caja representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo calculados como: $\max = p75 + 1.5 \cdot IQR$ y $\min = p25 - 1.5 \cdot IQR$, con $IQR = p75 - p25$. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites.

La tendencia del período 1975-2019 es de 10 m/dec, siendo 1975 el año con el valor medio más bajo (2095 m) y 2016 el más alto (2548 m). A escala estacional la isoterma está ascendiendo en verano y otoño con 35 y 29 m/dec respectivamente. Al contrario, en invierno y primavera se ha observado un descenso de -18 y -13 m/dec respectivamente.

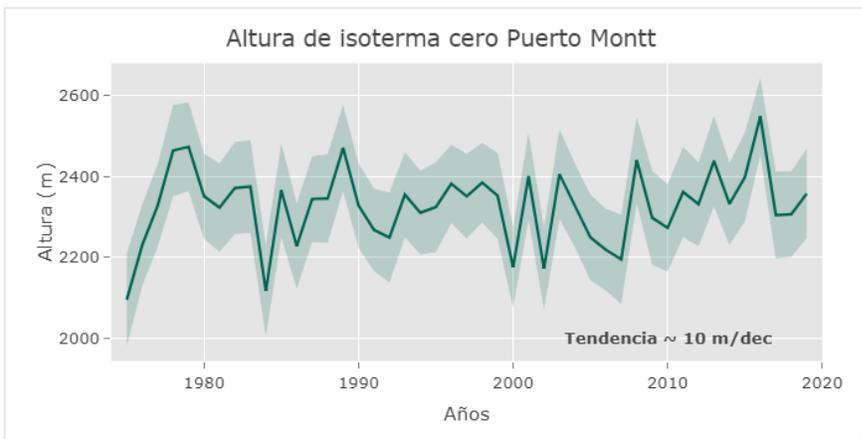


Figura 21. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea). La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

A diferencia de las estaciones de Antofagasta y Santo Domingo, en Puerto Montt no se observa la inversión térmica asociada a la subsidencia, por lo que en promedio la temperatura desciende de manera constante con la altura, la mayor parte del tiempo. Se encontraron tendencias negativas en los niveles bajos (1000 a 850 hPa) siendo el nivel de 925 hPa el que presenta el mayor descenso con $-0.1 \text{ }^\circ\text{C/dec}$. Se observan tendencias positivas desde 700 a 300 hPa aunque ninguna alcanza una

décima de grado siquiera (figura 22). Por último, se observa un ligero descenso en 200 hPa. Ninguna tendencia alcanzó significancia estadística.

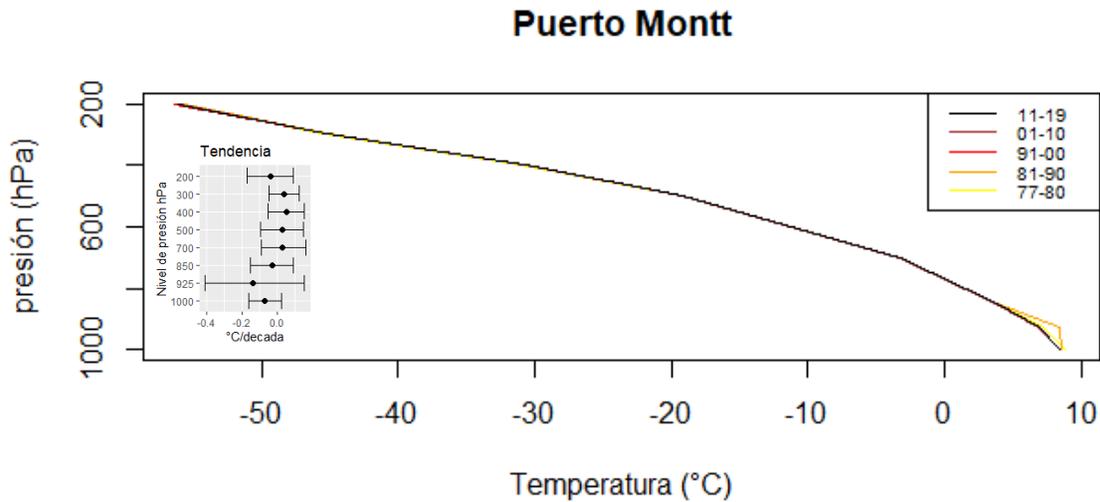


Figura 22. Perfil vertical (hPa) de temperatura período 1975-2019. Recuadro interior muestra las tendencias (°C/dec) y su intervalo de confianza al 95% para los niveles de presión 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 y 200 hPa. Los colores rojos indican tendencia significativa ($p < 0.05$).

Los eventos de isoterma cero sobre el p90% han presentado un aumento de 2 días/dec, sin embargo, este aumento está marcado por valores altos entre los años 2011 y 2016 (línea roja), que luego decaen, observándose los dos últimos años de la serie bajo el promedio (línea negra). Por otra parte, los días con iso 0°C bajo el p10% también presentan una tendencia positiva de 2 días/dec, con un crecimiento sostenido hasta el año 2011, donde comenzaron a caer los casos (figura 23). Cabe señalar que en promedio se producen más casos de días bajo p10% que sobre el p90% con 31 y 38 días respectivamente.

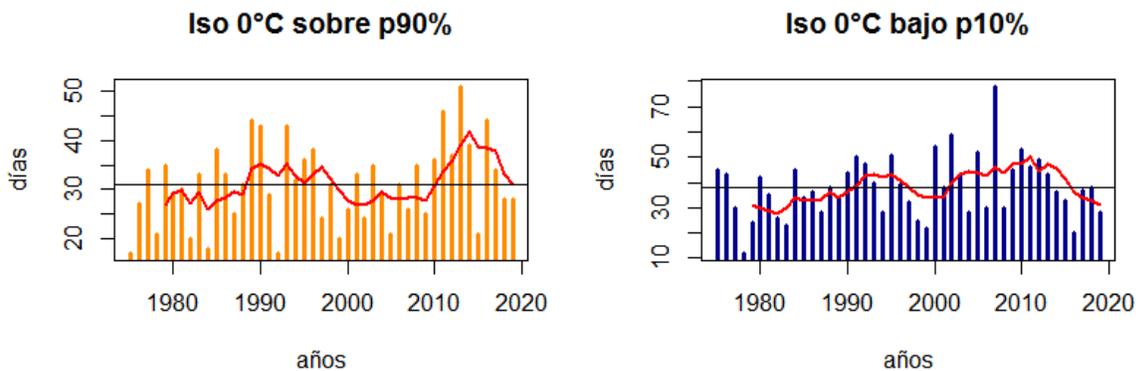


Figura 23. Días con isoterma cero sobre el percentil 90% (izquierda) y bajo percentil 10% (derecha). La línea negra muestra el promedio (1977-2019) y la línea roja es el promedio móvil de 5 años.

Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación

Para evaluar el comportamiento de la iso 0°C en días con precipitación se seleccionaron 34 estaciones, incluyendo Puerto Montt, las cuales alcanzan hasta 200 km de distancia de esta (figura 24). En esta ocasión no se usa la restricción de altura debido a que la isoterma cero alcanza el nivel de superficie, incluido el lugar de lanzamiento (Pto Montt) y sus alrededores. Como se observa en la figura 24, la distribución de las estaciones de precipitación es más homogénea en el territorio de la zona sur, abarcando tanto estaciones costeras como cordilleranas.

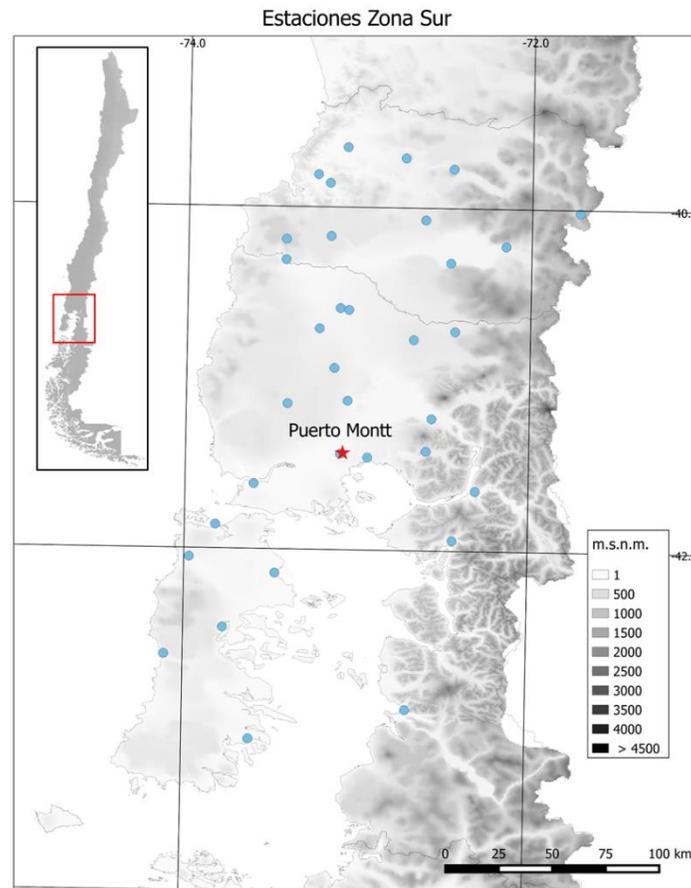


Figura 24. Ubicación de punto de lanzamiento de radiosonda (rojo) y estaciones de precipitación (celeste) en la zona sur.

La precipitación máxima (figura 25) de los días de lluvia, muestra que con montos bajos de precipitación (< 50 mm) se pueden observar tanto isoterma cero altas como bajas y pocas estaciones con precipitación simultánea. Con precipitaciones mayores los valores de isoterma tienden a

agruparse entre los 1000 m y 4000 m, registrando precipitación de manera simultánea en la mayoría de las estaciones cuando la lluvia es intensa.

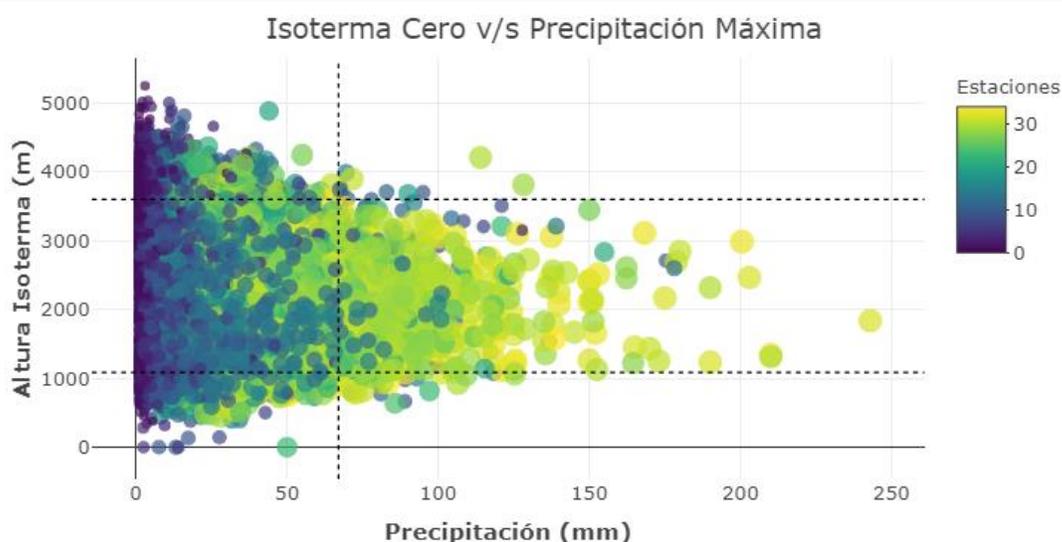


Figura 25. Gráfico superior se muestra altura de la isoterma cero en días con precipitación (eje y), versus la precipitación máxima para cada día de lluvia (eje x). En colores se muestra el número de estaciones que presentaron lluvia en ese día de manera simultánea. Las líneas horizontales representan los percentiles 10% y 90 % de la iso 0°C, mientras que la línea vertical muestra el p95% de la precipitación máxima diaria.

Del total de días de lluvia mayor a 1 mm, 688 de los casos superan el p95% de la precipitación (67 mm) que pueden considerarse como evento extremo de lluvia, y 1181 superan el p90 de altura de isoterma cero, por lo que pueden considerarse como evento cálido. Solo 11 días superaron ambos percentiles de isoterma cero y lluvia, de los cuales 2 días (posiblemente asociado a un mismo evento de lluvia) aparecen en el catastro de desastres del Sernageomín (Tabla 6).

año	mes	día	mm	Iso 0°C
1979	11	10	68.2	3711
1980	4	1	95.0	3702
1984	1	4	68.1	3786
1990	2	21	82.9	3705
1993	3	25	69.5	3985
1995	5	2	90.0	3680
2001	8	21	70.0	3602
2002	2	24	114.0	4205
2015	3	16	71.5	3892
2017 *	2	19	128.2	3807
2017 *	2	21	67.4	3742

Tabla 6. Fechas de eventos extremos de precipitación e iso 0°C, en la zona sur. Se destaca con * los eventos que aparecen en el Catastro de Desastres Naturales de Sernageomín.

Al comparar los días con y sin precipitación (figura 26) se puede observar que la isoterma cero es más baja en los días con lluvia, sin embargo, hay un comportamiento inverso en la dispersión entre ambos días. En los días con lluvia hay una mayor variabilidad de la isoterma en los meses de verano, aunque en invierno igualmente se observan valores atípicos altos (puntos figura 26), sobrepasando incluso los máximos de días sin lluvia. En cambio, en los días secos es en invierno donde se observa la mayor dispersión de la altura de la isoterma cero, y opuesto también a los días con lluvia los valores atípicos se producen en verano, asociados a isotermas bajas.

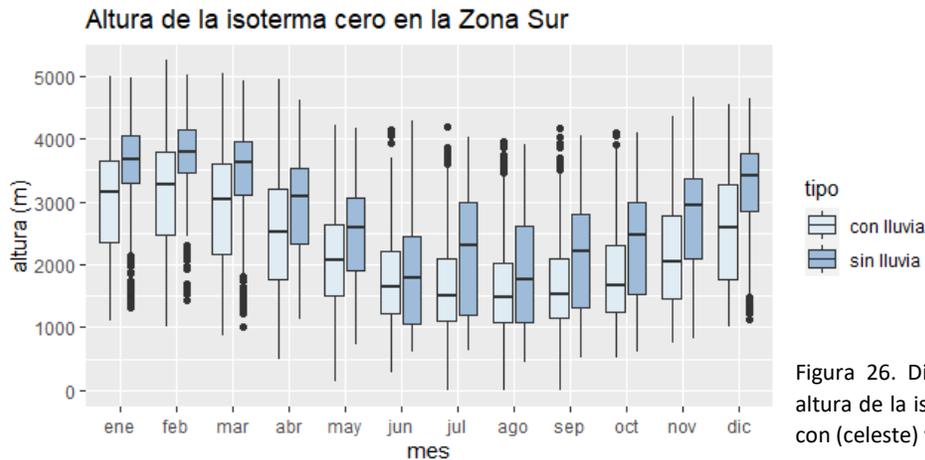


Figura 26. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero en los días con (celeste) y sin lluvia (azul).

La tendencia de la iso 0°C en días con precipitación alcanza los 28 m /dec, siendo el año 1975 el que presenta el menor valor, por debajo de los 2000 m en promedio y el año 2016 el mayor con una isoterma cero por sobre los 2400 m.

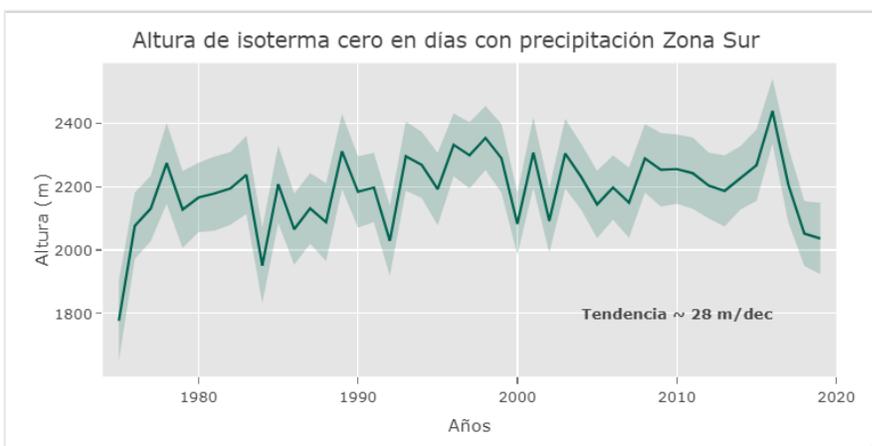


Figura 27. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea) en días con precipitación > 1mm. La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

ZONA AUSTRAL

En la zona austral el lanzamiento del radiosonda se realiza en el aeropuerto Carlos Ibañez del Campo de la ciudad de Punta Arenas, ubicado a 36 m de altura sobre el nivel del mar.

Comportamiento de la isoterma cero.

La iso 0°C tiene una altura media de 1143 m [1132,1155] en la estación de Punta Arenas. El mes de febrero es el que presenta la isoterma más alta con 1665 m en promedio, mientras que agosto tiene la más baja con 691 m (tabla 7). En cuanto a los extremos el P10% se mantiene bajo los 1000 todo el año con un mínimo en septiembre de 209 m y un máximo en enero de 864 m. Por otro lado, el P90% presenta diferencias mucho más notorias durante el año pasando de 3191 m en febrero a 1448 m en agosto.

TABLA 7. Altura Isotherma cero Punta Arenas.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	1525	1665	1553	1300	1073	768	747	691	843	980	1151	1360
P10	864	859	766	562	324	361	342	310	209	388	544	738
P90	2632	3191	3061	2499	1960	1688	1598	1448	1557	1698	1982	2266

No se aprecian grandes diferencias en la dispersión de los valores a través del año, salvo por febrero y marzo (figura 28) que presentan una mayor variabilidad. Destacan los valores atípicos asociados a isoterma alta durante todo el año, lo que demuestra ingreso de aire cálido. En los meses de invierno la isoterma alcanza el nivel de superficie y cerca del 75% de las observaciones no supera los 1000 m de altura.

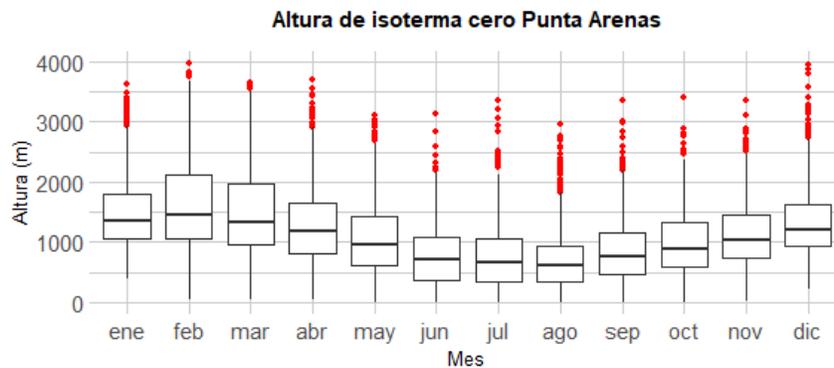


Figura 28. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero. Los bordes (superior e inferior) de la caja representan el p75 y p25, mientras que la línea en su interior es la mediana (p50), los límites de las líneas negras son el máximo y mínimo calculados como: $\max = p75 + 1.5 \cdot IQR$, y $\min = p25 - 1.5 \cdot IQR$, con $IQR = p75 - p25$. Los puntos rojos son los valores atípicos sobre o bajos los límites.

La tendencia es de -15 m/dec durante el período 1977-2019, siendo el año 1998 el que tiene el promedio más alto con 1291 m, mientras que el año 1986 tiene el más bajo con 997 m. La estación de primavera es la que tiene la tendencia mayor con -24 m/dec , que alcanza significancia estadística al 95%. Le sigue invierno, verano y otoño con -10 , -7 y -4 m/dec respectivamente.

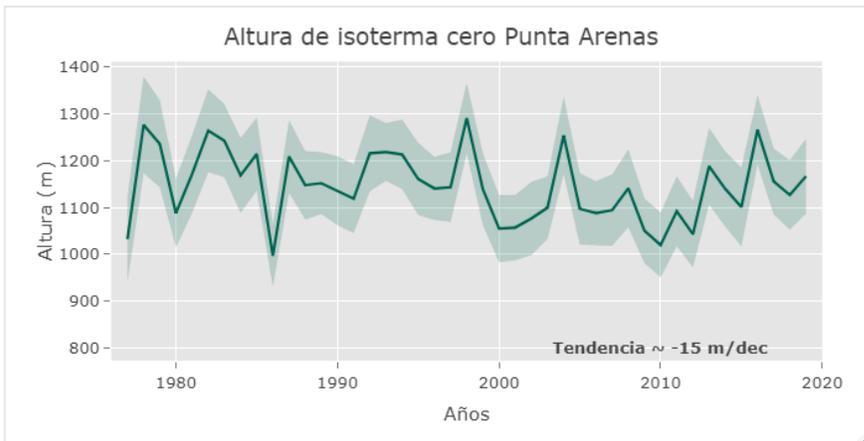


Figura 29. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea). La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

La tendencia de la isoterma cero estimadas desde los datos del radiosonda de Punta Arenas, presenta diferencias con lo encontrado por (DMC, 2020), que observó un aumento en la temperatura superficial para diferentes estaciones de la zona austral. Esto se corroboró calculando la tendencia de la temperatura para los niveles mandatorios 1000, 850, 700, 500, 300 y 200 hPa y así evaluar si corresponde a un fenómeno superficial o que se proyecta en altura (figura 30).

Las tendencias son débiles en los niveles bajos, van de $0.07 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ en 1000 hPa a $0.03 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ en 850 y 700 hPa. En 500 hPa aumenta a los $0.12 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ y $0.13 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ en 300 hPa siendo este nivel el que muestra el aumento más brusco y con significancia estadística. Luego en 200 hPa la tendencia se hace negativa con $-0.2 \text{ }^\circ\text{C/dec}$.

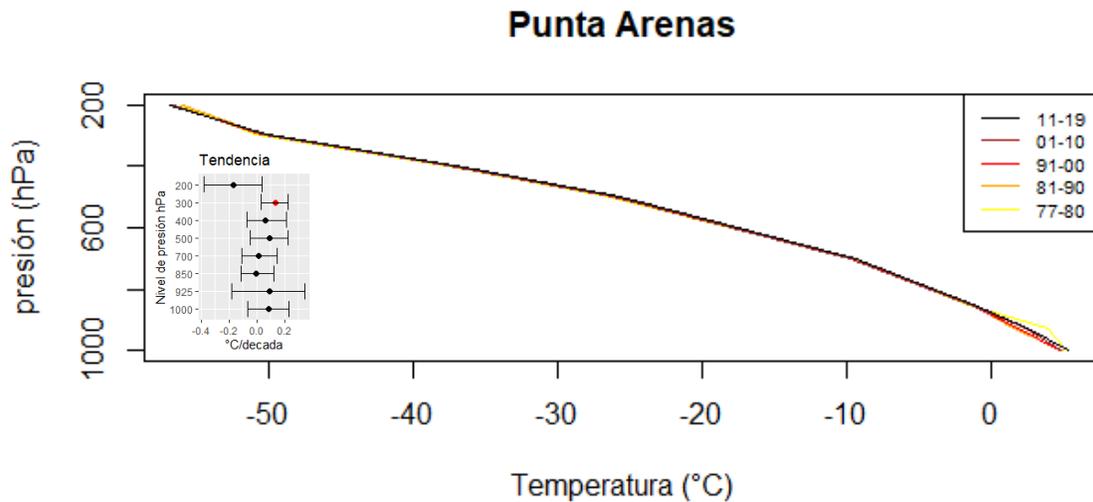


Figura 30. Perfil vertical (hPa) de temperatura período 1977-2019. Recuadro interior muestra las tendencias (°C/dec) y su intervalo de confianza al 95% para los niveles de presión 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300 y 200 hPa. Los colores rojos indican tendencia significativa ($p < 0.05$).

Como se observó en el perfil vertical las tendencias son positivas en los niveles bajos reflejándose en las primeras capas las tendencias observadas en las estaciones de superficie que presentan un aumento de las temperaturas extremas (DMC, 2020).

A pesar de esto, se ha observado un aumento de los días que la isoterma cero supera el p90%, alcanzando un máximo el año 2019 de 37 días. La tendencia alcanza 1 días/dec siendo estadísticamente significativa. Un aumento parecido se observa en los días bajo el p10% con 1 días/dec (significativa), siendo este aumento más sostenido en el tiempo hasta el año 2011, donde comienzan a bajar los casos figura 31).

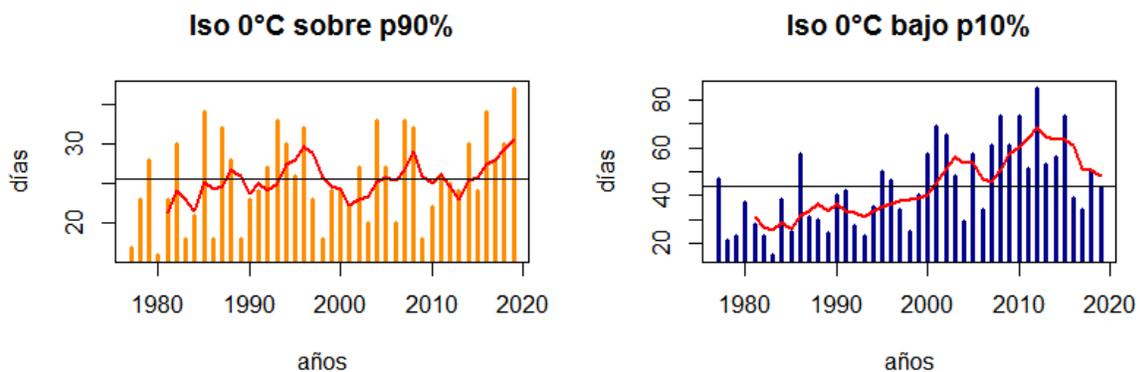


Figura 31. Días con isoterma cero sobre el percentil 90% (izquierda) y bajo percentil 10% (derecha). La línea negra muestra el promedio (1977-2019) y la línea roja es el promedio móvil de 5 años.

Comportamiento de la isoterma cero en días con precipitación

Para evaluar la isoterma cero en días con precipitación se seleccionaron 30 estaciones con datos de precipitación diaria en un radio de 200 km de Punta Arenas (figura 32).

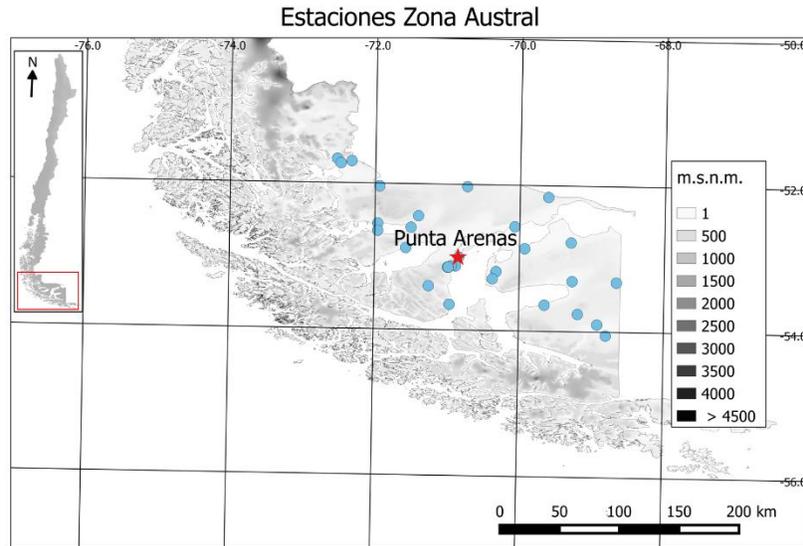


Figura 32. Ubicación de punto de lanzamiento de radiosonda (rojo) y estaciones de precipitación (celeste) en la zona norte.

Se puede observar en el gráfico de precipitación máxima (figura 33) que la isoterma en días de lluvia puede alcanzar desde cero hasta los 4000 m aproximadamente, sobre todo cuando los montos de precipitación son bajos (< 40 mm). Luego, a medida que aumenta la precipitación la isoterma tiende ubicarse bajo los 2000 m.

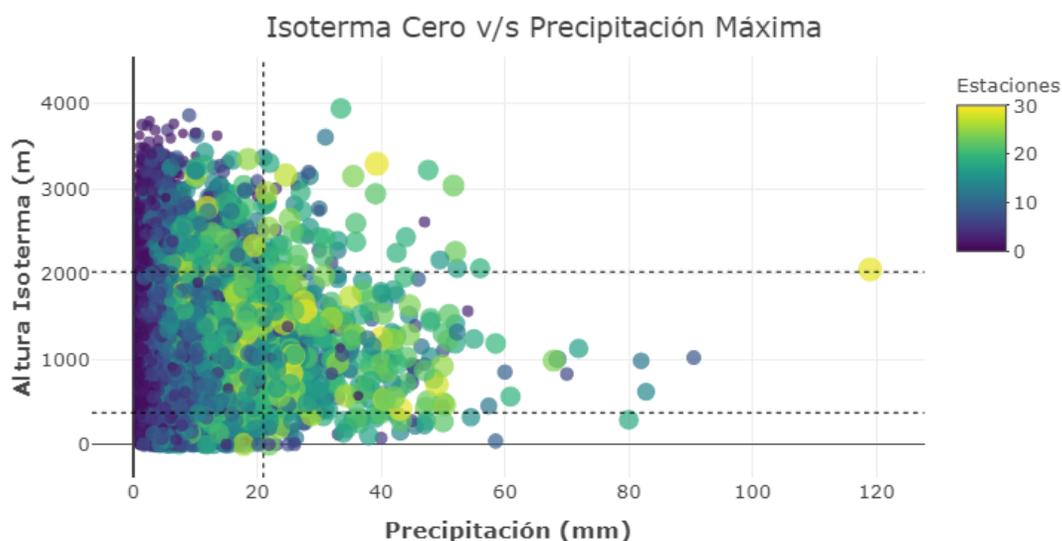


Figura 33. Gráfico superior se muestra altura de la isoterma cero en días con precipitación (eje y), versus la precipitación máxima para cada día de lluvia (eje x). En colores se muestra el número de estaciones que presentaron lluvia en ese día de manera simultánea. Las líneas horizontales representan los percentiles 10% y 90 % de la iso 0°C, mientras que la línea vertical muestra el p95% de la precipitación máxima diaria.

Respecto a los extremos, 651 de los días con precipitación superan el percentil 95% (21 mm) y 1127 días superan el percentil 90% en la isoterma cero (2027 m). En cuanto a los días que superan ambos umbrales se obtuvieron 61 casos.

Los eventos fríos (iso 0°C < 374m) se observaron 1162 días en que la isoterma está bajo el p10 y hay 135 (1%) días de lluvia con isoterma cero en superficie.

Tabla 8. Fecha de eventos que superan p95% de precipitación y P90% de isoterma en la zona austral. Se destaca con * los eventos que aparecen en el Catastro de Desastres Naturales de Sernageomín.

año	mes	día	mm	iso 0°C					
					1994	2	19	30.0	2433
1977	2	7	22.8	2172	1994	3	17	21.0	2809
1983	4	19	30.0	2751	1994	4	2	26.0	2819
1983	4	24	32.0	2132	1994	12	9	21.2	2128
1984	3	20	21.0	2291	1995	3	10	26.2	3042
1986	5	17	30.0	2281	1997	4	1	33.0	2278
1990	3	17	21.4	2321	1998	2	15	23.0	3005
1990	11	16	28.1	2437	1998	2	27	56.0	2068
1991	3	18	24.0	2050	1998	3	1	27.0	2469
1991	3	27	28.5	2547	1998	3	2	22.0	2264
1992	12	11	23.5	2357	2000	1	3	44.0	2434
1993	2	23	47.6	3220	2000	2	24	24.0	2335
1993	2	24	42.5	2250	2003	10	14	26.5	2098
1994	1	13	28.5	3149	2004	2	27	31.0	3607

2004	5	4	27.0	3103	2009	3	15	24.0	2196
2005	3	3	51.7	3040	2012	1	4	35.5	3151
2005	3	4	30.7	2212	2012	1	9	22.9	2030
2005	4	3	52.3	2070	2012 *	3	10	21.6	2213
2005	12	27	47.0	2612	2012 *	3	11	119.0	2055
2005	12	29	23.0	2520	2013	2	3	28.3	3197
2006	1	5	52.0	2263	2013	4	3	24.6	3162
2006	1	17	27.3	2741	2014	2	27	21.8	2545
2006	1	18	35.9	2379	2014	3	26	22.0	3304
2006	2	24	33.0	2392	2015 *	4	22	39.1	2943
2006	4	16	30.0	2769	2016	2	2	39.3	3294
2007	1	23	27.0	2958	2016	10	3	49.5	2167
2007	1	24	35.9	2597	2017	2	28	21.5	2955
2007	9	29	21.0	3366	2019	3	16	26.5	2221
2007	12	18	33.5	3945	2019	3	17	25.8	2503
2008	2	26	21.6	2857	2019	4	1	25.3	2649
2008	2	27	21.5	2826	2019	4	5	31.0	2420

El diagrama de cajas (figura 34) muestra que la isoterma es más variable en los días sin lluvia a través del año siendo los meses de verano y otoño los que presentan la mayor dispersión. Además, en estos meses se observa un descenso de la altura de la isoterma cuando llueve, situación que no ocurre en los meses fríos donde la isoterma no cambia mayormente en días con lluvia.

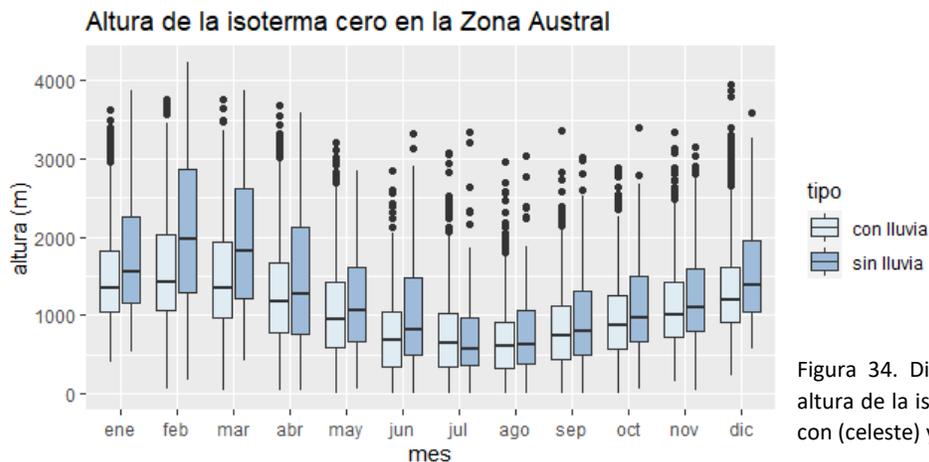


Figura 34. Diagrama de cajas de la altura de la isoterma cero en los días con (celeste) y sin lluvia (azul).

Respecto a la tendencia anual (figura 35) en los días con precipitación, la altura de la isoterma cero descende a razón de -24 m/dec, tendencia influenciada por promedios altos durante los primeros años de registro (fines de la década del 70 a inicio de la del 80).

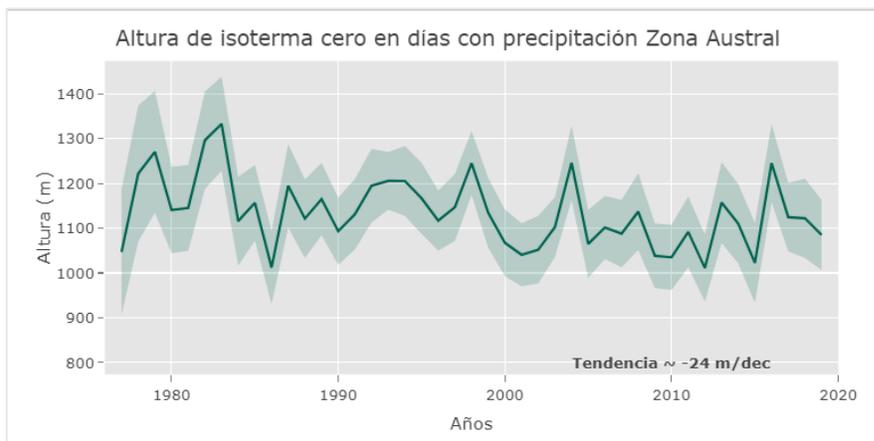


Figura 35. Promedio anual de la altura de la isoterma cero (línea) en días con precipitación > 1mm. La región sombreada indica el intervalo de confianza al 95%.

CONCLUSIÓN

Se estimó la altura de la isoterma cero con el fin de evaluar su comportamiento climatológico y también para observar las tendencias durante los últimos años. Los principales resultados encontrados se resumen en las siguientes conclusiones:

- **Zona norte:** La altura media de la isoterma cero en Antofagasta es de 4687 m, presentando valores altos en meses estivales que llegan a 5060 m en promedio en enero y valores bajos en invierno con 4296 m en julio. En los días con precipitación no se observa un descenso en la altura durante los meses de verano respecto a los días secos, mientras que en invierno la isoterma desciende cuando llueve. De un total de 6 días con extremos de lluvia e isoterma cero alta dos produjeron eventos de remoción en masa, de acuerdo, al catastro de desastres naturales. Además, se encontró un aumento de 40 m/dec, mientras que en los días con precipitación este alcanza los 22 m/dec. Estas tendencias coinciden con un aumento de temperatura del aire entre los niveles de 850 y 300 hPa.
- **Zona central:** La iso 0°C en Santo Domingo tiene una altura promedio de 3588 m, donde los valores más altos se producen en el período estival con un promedio en enero de 4351 m y los valores más bajos en invierno, teniendo julio un promedio de 2913 m. Se observa un descenso en la altura de la isoterma cero en los días con precipitación respecto a los días secos, el que es más marcado en los meses de invierno. Solo 3 días superaron los umbrales de precipitación e isoterma alta sin encontrarse registro en el catastro de desastres naturales. La tendencia indica la altura de la iso 0°C está aumentando a razón de 16 m/dec, aunque al considerar solo los días con precipitación esta tendencia cae a -42 m/dec. En general la temperatura del aire está aumentando de manera débil en los diferentes niveles de altura.
- **Zona sur:** La isoterma cero en Puerto Montt presenta una altura promedio de 2328 m, siendo el mes de febrero el que alcanza el promedio mayor con 3281 m, mientras que, en agosto se observa el menor con 1647 m. Al igual que en la zona central la zona sur también presenta un descenso de la isoterma cero en los días con precipitación. Se encontraron 11 días con isoterma cero alta y precipitación extrema, de los cuales 2 generaron remociones o inundaciones. La tendencia alcanza un aumento de 10 m/dec y se hace mayor en los días con precipitación llegando a 28 m/dec. Respecto a los cambios en la vertical se observó un descenso de temperatura en niveles bajos (1000-850 hPa) y un aumento entre los niveles de 700 y 300 hPa, aunque ninguna tendencia fue significativa.

- **Zona austral:** La iso 0°C tiene una altura media de 1143 m en la estación de Punta Arenas. El mes de febrero es el que presenta la isoterma más alta con 1665 m en promedio, mientras que agosto la más baja con 691 m. La isoterma cero desciende en los días con lluvia y alcanza con mayor frecuencia el nivel de superficie. Se encontraron 61 días con extremos de lluvia e isoterma, para los cuales sólo 2 se encuentran registrados en catastro de desastres como evento de remoción en masa o inundación. En este caso se encontró que la altura de la isoterma cero presenta una disminución de -15 m/dec, mientras que en los días con precipitación alcanza -24 m/dec, situación que contrasta con lo observado en la temperatura de niveles bajos que presentan ligeros aumentos de temperatura.

REFERENCIAS

Alexandersson H., Moberg A., 1997. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *Int. J. Climatol.*, Vol. **17**, 25–34.

Barrett, B. S., D. A. Campos, J. Vicencio Veloso, and R. Rondanelli (2016), Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, doi:10.1002/2016JD024835.

Comité Científico Técnico ONEMI, 2015. Análisis multisectorial eventos 2015: Evento Hidrometeorológico Marzo – Terremoto/Tsunami Septiembre.

Carrasco J., Osorio R., Casassa G., 2008. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, Vol. **54**, 186.

Carrasco, J.F., G. Casassa and J. Quintana. 2005. Changes of the 08C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrol. Sci. J.*, **50**(6), 933–948.

Dirección Meteorológica de Chile, 2020. Impacto del cambio climático en el FIR Austral-Chile.

Espinosa, G., Hajek, E., Fuentes, E. 1985. Distribución geográfica de los deslizamientos de tierras asociados a desastres en Chile. *AMB. y DES.*, VOL I, N° 2, págs. 81-90.

Falvey, M., and R. D. Garreaud (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), *J. Geophys. Res.*, **114**, D04102, doi:10.1029/2008JD010519.

Garreaud R., 2013. Warm Winter Storms in Central Chile, *Journal of Hydrometeorology*, **14**, 1515-1534.

Primer Catastro Nacional de Desastres Naturales del Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017.

Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R. Lavado, W., Bolivar Cáceres, C., 2015: Impact of the global warming *hiatus* on Andean temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, DOI: 10.1002/2015JD023126

Libiseller, C. and Grimvall, A., 2002, Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics* **13**, 71–84, <http://dx.doi.org/10.1002/env.507>.

Propagate R: <https://www.rdocumentation.org/packages/propagate>

Zhang M., Dong L.i, Wang S., Zhao A., Qiang F., Sun M., Wang Q., 2014: Increasing free-air 0°C isotherm height in Southwest China from 1960 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, **24**(5): 833-844.



Dirección General de Aeronáutica Civil

Dirección Meteorológica de Chile

Oficina Cambio Climático

Avenida Portales 3450, Estación Central, Santiago, Chile

Contacto: comunicacional_dmc@meteochile.cl

www.meteochile.gob.cl