

# CLIMATOLOGÍA DE LAS PRECIPITACIONES OROGRÁFICAS DE INVIERNO SOBRE LOS ANDES SUBTROPICALES CENTRALES

Maximiliano Viale <sup>1</sup> y Mario N. Nuñez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT-CONICET-Mendoza, Argentina.*

<sup>2</sup> *Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), CONICET/UBA y FCEN-UBA, Buenos Aires, Argentina.*

## Resumen

Es conocido que los sistemas de precipitación baroclínicos embebidos en los oestes de latitudes medias son bloqueados por las cadenas montañosas durante el invierno. Este trabajo examina la distribución espacial de las precipitaciones de invierno sobre la cordillera de los Andes y zonas bajas aledañas entre los 30°-36°S. Los Andes en este sector representan una barrera orográfica formidable, debido a su altura media de ~ 4 km, con pocos pasajes inferiores a los 3 km, y a su disposición perpendicular al flujo prevaleciente del oeste. El campo medio de precipitación invernal, obtenido a partir de 74 estaciones durante el periodo 1970-1976, presentó máximos sobre las laderas pendiente arriba de Chile, antes de alcanzar la altura máxima de la cordillera, y una marcada disminución en dirección transversal a la misma, siendo este un patrón típico de las cadenas más altas del mundo. Este resultado fue consistente con un aumento de la frecuencia en alta montaña y disminución a sotavento en relación a las zonas bajas a barlovento. El 75% de la precipitación invernal fue acumulada durante los días de mayor intensidad con solo una frecuencia de ocurrencia del 25%. Esta característica fue igual para las estaciones de montaña y tierras bajas a barlovento, sugiriendo estar asociado a la latitud de la región, ubicada en una zona de transición entre latitudes medias y tropicales. Al evaluar la relación entre la precipitación media areal de diferentes zonas cordilleranas en la dirección oeste-este, se reflejó la fuerte alteración que sufren las precipitaciones, probablemente causadas en su mayor parte por movimientos verticales topográficamente inducidos. La precipitación resultó incrementada en un factor cercano a 2 en las laderas pendientes arriba, entre 33°-34°S, y altamente reducida en un factor ~15, entre 31°-33°, y ~5 entre 34°-35°S, con respecto a la precipitación en zonas bajas a barlovento (representativa de la aún “no” afectada por la orografía). El efecto bloqueante de la barrera de los Andes sobre las precipitaciones de invierno en esta región es notorio, a tal punto que altera los regímenes de precipitaciones en zonas bajas aledañas, siendo de invierno a barlovento y de verano a sotavento.

---

<sup>1</sup> Dirección del autor: Maximiliano Viale  
IANIGLA-CCT-Mendoza-CONICET C.C.330  
e-mail: [viale@cima.fcen.uba.ar](mailto:viale@cima.fcen.uba.ar)

# CLIMATOLOGY OF WINTER OROGRAPHIC PRECIPITATION OVER THE SUBTROPICAL CENTRAL ANDES

## Abstract

It is known that the approaching baroclinic storms in the middle-latitude westerlies are profoundly modified and blocked when they impinge on the high mountain ranges. This study examines the spatial distribution of wintertime precipitation over the Andes and surrounding lowlands between 30°-36°S. The Andes in this sector represent a formidable orographic barrier, due to its high mean altitude ~ 4 km, with a few passages lower than 3 km, and its perpendicular disposition to prevalent flow. The winter mean map of precipitation, obtained from 74 stations for 1970-1976, showed maximum accumulation on upslope zones before the crest of the Andes, and a marked decrease in cross-barrier direction. This represents a typical orographic precipitation pattern of the higher mountain ranges; and also, was consistent with the observed increase (decrease) in daily precipitation frequency on high mountain (leeward). About 75% of total wintertime precipitation was accumulated by days with higher precipitation rates and low frequency of occurrence (~25%). This feature in daily precipitation distribution was noted at stations on lowlands of windward side and over the high mountain, suggesting being associated with the latitude, and not with the topography. The ratios of the areal precipitation, between different mountainous zones in cross-barrier direction, reflected the strong modification that suffers the precipitation systems. The precipitation was increased in a factor near to 2 on upslope between 33°-34°S, and largely reduced in a factor ~15, in 31°-33°S band, and ~5 in 34°-35°S, with respect to precipitation recorded at low-laying stations on windward side (representing the still "not" affected by the orography). The blocking effect of the Andes barrier over the wintertime precipitation in this region is notorious, to the point that modify the precipitation regime on surrounding lowlands of two side, having a winter regime at windward and a summer regime at lee side.

## 1. INTRODUCCION

En la región Andina de Sudamérica, la dificultad en caracterizar características locales en las precipitaciones orográficas mayormente reside en la escasez de estaciones meteorológicas. Falvey y Garreaud (2007) destacaron las limitaciones observacionales existentes en el sector de los Andes de Chile Central, para lograr establecer la precipitación incrementada en las zonas pendiente arriba de la cordillera. Colle y Mass (2000), por ejemplo, notaron que a partir de una densa red de observación en las Cascades de Washington que el máximo de precipitación estuvo algunos kilómetros corriente arriba de la cresta con una significativa precipitación disminuida a sotavento. En cambio, en una barrera mas baja y angosta, este máximo es usualmente observado mas cerca de la cresta [e.g., sobre las sierras costeras de Oregon (Colle and Mass 2000) y los Alpes de Nueva Zelanda (Sinclair y otros 1997)].

En este trabajo se examina la distribución espacial de las precipitaciones de invierno sobre los Andes Subtropicales Centrales y sectores bajos adyacentes (30°-36°S), con un énfasis en identificar

la influencia de la orografía. Esencialmente, se plantea la siguiente pregunta clave: ¿Cuan importante es la influencia de la cordillera de los Andes en la banda latitudinal 30°-36°S sobre las precipitaciones de invierno, asociadas a ciclones extratropicales embebidos en el cinturón de los oestes de latitudes medias?

## 2. DATOS Y METODOLOGÍAS

Para un análisis de la distribución espacial de la precipitación sobre y en los alrededores de un terreno sumamente complejo, como el de la cordillera de los Andes, es necesario contar una red de observaciones lo suficientemente densa. Esto es realmente una limitación importante en los Andes en relación con otras cadenas montañosas del mundo (e.g., los Alpes Europeos, las cadenas Sierra Nevada y Cascades en el oeste de U.S.A., los Alpes del sur de Nueva Zelanda). Asimismo, las mediciones de cantidad de nieve en alta montaña tienen una dificultad natural que radica en la complejidad de la zona, por lo general de muy difícil acceso, deshabitada y expuesta a condiciones de mucho frío y fuertes viento durante el invierno. En

nuestra región existió un retroceso en la red observacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) en los últimos 30 años, disminuyendo el número de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio de Argentina y Chile. A mediados de los años 70, Argentina contaba con al menos 5 estaciones de montaña; en cambio en el presente, el SMN solo cuenta con una estación meteorológica de montaña dentro de la zona de estudio capaz de medir nieve (i.e., Puntas de Vacas).

En virtud de lo antes señalado, se seleccionó la base de datos de precipitaciones para el periodo de 7 años, 1970-1976, la cual constituye la red más densa disponible tanto en la zona montañosa, como en las zonas bajas aledañas. En la Figura 1a se puede apreciar el área de estudio con las estaciones utilizadas. Se dispuso de al menos 12 estaciones de montaña, 4 con información diaria y 8 con registros mensuales de la precipitación (Tabla I). Las estaciones de montaña constaban con observadores in-situ quienes realizaban en forma detallada las observaciones nivológicas. Mediciones de la altura y densidad de la nieve y equivalente de agua de nieve se registraban diariamente a las 1200 UTC, como así también, hora de inicio y fin de la precipitación, formas y tamaños del hidrometeoro, entre otras. Para un mayor detalle de las observaciones nivológicas consultar las publicaciones del SMN, Instrucciones Nivológicas (1958) y Pluviometría (1984). Del total de 76 estaciones disponibles (Fig. 1), 50 están ubicadas al oeste de la línea divisoria de aguas (Chile), de las cuales 2 contienen series de precipitaciones diarias y cuyas fuentes son DMC y el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA), y 48 son series mensuales obtenidas de la Dirección General de Aguas (DGA) y la "Global Historical Climatology Network" (GHCN). Al este de la divisoria (Argentina), se contó con 7 estaciones de la Dirección General de Irrigación (DGI) con información mensual y 20 estaciones con información diaria pertenecientes al SMN. El criterio de selección de las series para producir el campo medio de precipitación invernal fue que debían tener un faltante menor al 5%. En el caso de las series mensuales esto significó un faltante menor o igual a 2 meses, a lo cual se restringió que esos meses faltantes no sean los de pleno invierno (Junio, Julio y Agosto). Aunque son retenidas para análisis adicionales, las estaciones Cristo Redentor

y Barreal del SMN son descartadas al aplicar este criterio; y un total de 74 estaciones son utilizadas para producir el campo medio de precipitación invernal.

En la Figura 1 se muestra también la topografía con una alta resolución horizontal (1 km), lo que permite distinguir la complejidad del terreno, con las zonas bajas de los valles y por donde descienden los ríos. Los Andes entre 30°-36°S son aproximadamente un ideal obstáculo bidimensional debido a su orientación (Norte-Sur) perpendicular a los oeste, su escasa anchura (~150 km) y su elevada altitud media (~ 4 km), lo cual, junto a su proximidad al Océano Pacífico (~ 200 km), lo convierten en una gran barrera para la advección de humedad y los sistemas de precipitación baroclínicos provenientes del oeste. El corte longitudinal aproximadamente a lo largo de la divisoria en la Fig. 1b resalta esta característica, sobresaliendo tres picos más altos de los 6000 m de altura, los escasos pasajes por debajo de los 3000 m y la marcada caída de la altura media al sur ~35°S. Es de esperar, por lo tanto, que la barrera orográfica de los Andes Subtropicales Centrales tenga una fuerte influencia sobre los sistemas de precipitación baroclínicos de los oestes.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Distribución espacial de las precipitaciones invernales sobre la región de los Andes Subtropicales Centrales

Los resultados presentados en este estudio amplia antecedentes diagnósticos climáticos sobre regiones más extensas de Sudamérica que incluyen la estudiada aquí (Hoffman 1975, Prohaska 1976, Miller 1976), y sobre regiones más pequeñas que la incluyen parcialmente (Ereño y Hoffman 1978, Falvey y Garreaud 2007). Los primeros se han enfocado en documentar el clima de Sudamérica sin detenerse en profundidad en el efecto orográfico de los Andes; mientras que los dos últimos estudios han documentado el efecto orográfico sobre las precipitaciones pero limitado a la latitud de 33°S y al sector a barlovento pendiente arriba de la cadena montañosa. Específicamente, este trabajo extiende el análisis a lo que sucede inmediatamente al este de los picos más altos, aún dentro de la zona de alta montaña, como así también en los sectores pendientes abajo a sotavento de los Andes

Centrales. Es decir, se realiza un análisis espacial de la precipitación sobre y en ambos sectores bajos adyacentes a la cadena montañosa.

En la Figura 2a se presenta la distribución de la precipitación media de invierno sobre la cordillera y sus alrededores. Se destacan dos características principales, el marcado decaimiento hacia el norte de las lluvias de barlovento y el fuerte gradiente este-oeste en la cordillera al sur de 32°S. En la zona central de Chile, las precipitaciones invernales varían desde ~800mm a los 36°S hasta menos de 100 mm a los 30°S. Esta característica ha sido ampliamente documentada por Miller 1976, Montecinos y otros 2000, Falvey y Garreaud 2007, entre otros; quienes resaltan que esta banda latitudinal subtropical es una zona de transición entre el permanente clima árido del norte de Chile, uno de los más secos del mundo, y la zona húmeda con precipitaciones extratropicales de latitudes medias. Por otro lado, el campo de isoyetas cambia su gradiente de dirección norte-sur en las zonas bajas de Chile central, por un fuerte gradiente este-oeste en la cordillera al sur de 32°S. A pesar de contar con escasas estaciones de montaña, estas fueron capaces de generar un campo de isoyetas con pequeños máximos de precipitación, alrededor de los 33° y 34°S, sobre la zona pendiente arriba de los picos más altos de los Andes (i.e., antes de la divisoria, Fig. 1a). A partir de estos máximos la precipitación comienza a disminuir en forma muy marcada hacia el este, según el campo de isoyetas alineado en forma paralela al eje de la barrera orográfica. Esta disminución de la precipitación es notoria, con valores en tierras bajas a sotavento que representan el 10%, o menos, de dichos máximos pendientes arriba.

Las frecuencias de los días de precipitación en el invierno a partir de las series diarias disponibles se muestran en la Figura 2b. La frecuencia a sotavento de la cordillera es menor que a barlovento y en alta montaña; y se distingue también, un leve incremento en alta montaña con respecto a la estación ubicada en zonas bajas a barlovento (Santiago de Chile). Otra característica apreciable es una leve disminución de las frecuencias hacia el norte en las todas las estaciones, es decir sin importar en el área cordillerana que se encuentren. La disminución de la frecuencia hacia el norte explicaría en parte la disminución hacia el norte de la cantidad precipitación observada sobre en sectores bajos adyacentes y alta montaña (Fig. 2a).

En orden de resaltar la alteración que sufre los sistemas de precipitación de invierno por la cordillera, se muestran en la Figura 3 cortes transversales oeste-este a la misma de la precipitación media para diferentes bandas latitudinales. Para el análisis de los cortes se clasifican las precipitaciones en tres zonas diferentes a través de la cordillera: tierras bajas a barlovento y sotavento, y alta montaña; a esta última a su vez se la subdivide en sub-zonas pendiente arriba de los picos más altos e inmediatamente al este de los mismos. En la sector central donde se cuenta con cuatro estaciones en la zona pendiente arriba de los Andes (Figs. 3b y 3c), las precipitaciones son incrementadas en las laderas cuesta arriba con respecto a zonas bajas de Chile, y luego, marcadamente disminuidas en zonas bajas a sotavento. Estos incrementos y decaimientos son apreciables también en la banda latitudinal más al sur (Fig. 3d), aunque en menor grado. En la zona mayormente muestreada alrededor de 33°S (Fig. 3b), puede verse con mejor detalle los cambios abruptos que ocasiona la cordillera en la dirección perpendicular a la misma, generando incrementos y disminuciones muy marcados en distancias menores de 40 km. La precipitación en estaciones inmediatamente al este de la divisoria es similar a la de zonas bajas a barlovento (Fig. 3). Es evidente en todas las bandas latitudinales de la Fig. 3 que la disminución de la precipitación en tierras bajas a sotavento es alta. Inmerso en este patrón con lluvias incrementadas cuesta arriba de los Andes, y disminuidas a sotavento, se distingue la disminución hacia el norte en forma conjunta en todos los sectores de la cordillera (mencionado antes).

La precipitación incrementada por el efecto de ascenso forzado de los Andes es testada por la proporción de precipitación observada en el sector pendiente arriba con aquella en tierras bajas a barlovento. En las banda latitudinales de 33° y 34°S, las precipitaciones son del orden de 300 y 450 mm en zonas bajas y de 700 y 750 mm en pendientes arriba, respectivamente (Figs. 3b, 3c y Tabla II), determinando una tasa de incremento de la precipitación media cercana a 2. Este valor es similar al reportado por Falvey y Garreaud (2007) para precipitaciones medias de invierno en la misma región andina. Análogamente, se puede testar la tasa de precipitación disminuida por efecto de descenso forzado al este de la divisoria. Inmediatamente al este de los picos más altos la disminución, con respecto a la precipitación pendiente arriba, alcan-

za un factor cercano a 2 en las bandas 33° y 34°S, y un valor pequeño de 1.1 en 35.5°S (Tabla II). Tomando como referencia la precipitación en zonas bajas a barlovento, representativa de la no afectada aún por la orografía, la disminución en tierras bajas a sotavento aumenta hacia el norte siendo del orden de 5 a 19 veces menor a la de barlovento (Tabla II). En particular, el perfil a través de la cordillera para la banda de 33°S es similar con el régimen pluvial documentado por Ereño y Hoffman (1978). En general, puede verse en la Tabla II que las alteraciones de las precipitaciones de este-oeste a través de la cordillera se acentúan de norte a sur, lo cual es coincidente con el aumento de la altura de la cadena de los Andes en el mismo sentido (ver Fig. 1b). Este resultado sugiere que los más intensos incrementos (decaimientos) de las precipitaciones en los sectores más al norte obedecerían a mayores ascensos (descensos) forzados por una topografía más alta.

### 3.2. Regímenes de precipitación sobre la región de los Andes Subtropicales Centrales

La existencia de regímenes de precipitación invernal diferentes, entre las zonas a barlovento y alta montaña con la zona baja a sotavento, es ampliamente conocido y ha sido mencionado en numerosos estudios climáticos (Prohaska 1976, Miller 1976, Compagnucci y Vargas 1998, Montecinos y otros 2000, Masiokas y otros 2006, entre otros). Sin embargo, se muestra aquí con un mayor grado de detalle para la región andina central de escala espacial relativamente más pequeña a dichos estudios.

En la Figura 4 se muestran las precipitaciones anuales e invernales durante 1967-1976 para estaciones representativas de las diferentes zonas cordilleranas, incluyendo los porcentajes que representa la precipitación invernal de la total anual. Se distingue en todas las estaciones una alta variabilidad interanual, con años bien por debajo de la media y años con lluvias muy por encima de la media. En particular, el año 1972 esta entre los 5 años con mayores nevadas sobre los Andes Centrales en 50 años (1951-2005, ver figura 2 de Masiokas y otros 2006). Es apreciable también, sobretudo en estaciones de Chile y montaña, como la variabilidad año a año es similar en todas las estaciones. Estas características han sido también documentadas en los trabajos recientemente mencionados.

Los porcentajes que representan la precipitación de invierno de la total anual son mayores en las estaciones a barlovento y alta montaña que en las de zona bajas a sotavento (Fig. 4). Estos no superan el 40% de la precipitación anual para las estaciones a sotavento al norte de los 34°S, mientras que en todas las estaciones a barlovento y de montaña los valores superan el 80%, alcanzando el 100% en algunos años y localidades. Es importante remarcar, que si bien existen grandes diferencias en cantidades medias entre las zonas cordilleranas de barlovento, pendiente arriba e inmediatamente al este de picos más altos, no se aprecian diferencias en los porcentajes de la precipitación de invierno en estas tres zonas. Este resultado es un buen indicador de que estas zonas pertenecen al mismo régimen de precipitaciones de invierno, y claramente se diferencian de la distribución anual en la zona baja a sotavento. Esto es coincidente con un verano sumamente seco en zonas bajas de transición de Chile Central (31°-42°) de acuerdo a la climatología de Miller (1976). En el caso de particular de la estación Malargüe, el porcentaje esta entre los 40-60% (Fig. 4), siendo la lluvia de invierno tan importante como la de verano. La marcha anual en Malargüe de las estadísticas 1961-1990 del SMN muestra un máximo de verano y otro de invierno. Esta estación se ubica en una zona de transición entre las regiones a sotavento de los altos Andes Centrales de Cuyo, con lluvias convectivas de verano, y a sotavento de los Andes Patagónicos de Neuquén (relativamente mas bajos), con "lluvia desbordante" de invierno [i.e., *spillover precipitation* en ingles, parte de la precipitación orográfica que logra pasar los picos más altos por el viento y alcanza la superficie a sotavento de la barrera orográfica (AMS Glossary of Meteorology 2000)].

La matriz de correlaciones corregidas de la Tabla III permite discriminar también las estaciones con diferentes regímenes de precipitaciones a partir de las series diarias de invierno. Debido a que la cantidad de días con precipitación simultánea (que determinan la correlación entre cada par de estaciones) es variable para diferentes pares de estaciones, se utilizó el índice lineal de correlación corregido ( $\tilde{r}$ ) definido por Compagnucci y Araneo (2005). Este índice combina el coeficiente de correlación muestral calculado ( $r$ ) y el coeficiente de correlación crítico ( $r_c$ ) al 5% de significancia, el cual depende del números de pares muestral, y por

lo tanto, permite independizarse del n-muestral haciendo estadísticamente comparables las correlaciones. La correlación es significativa entre las precipitaciones a barlovento, en la montaña e inclusive Malargüe (recuadro azul en Tabla III); mientras que por otro lado, la correlación es significativa entre estaciones a sotavento (recuadro rojo). Resultados similares encontraron otros trabajos, pero a partir de series de totales invernales y mensuales de precipitación y con un número relativamente menor de estaciones (ver Fig. 1b en Compagnucci y Vargas 1998 y Fig. 3a en Masioskas y otros 2006). No obstante, las correlaciones obtenidas aquí permitieron diferenciar entre dos grupos de estaciones con regímenes de precipitaciones distintos, indicando la significativa influencia de la montaña alterando los mismos.

Una vez mostrado la existencia de dos regímenes de precipitaciones distintos de un lado y al otro de la cordillera, se describe la distribución de las precipitaciones diarias durante el invierno en los sectores de tierras bajas a barlovento y alta montaña, ambos con un régimen invernal. En general, se aprecia que la distribución de la precipitación en Quinta Normal y Puente del Inca son muy similares entre sí (Figs. 5a y 5c), mientras que por otro lado, lo mismo sucede entre Lagunitas y Valle Hermoso (Figs. 5b y 5d). Los límites de los cuartiles son semejantes entre estos ambos pares de estaciones, con valores bajos para el primero y segundo cuartil. La similitud entre las estaciones en tierras bajas a barlovento (Fig. 5a) e inmediatamente a sotavento (Fig. 5c), no es solo en los valores medio (como se mostró anteriormente), sino que también lo es en sus distribuciones. La única pequeña diferencia entre estas fue en la frecuencia de días totales con lluvia, siendo en la de alta montaña un tanto mayor. No obstante, existe una gran diferencia entre las estaciones de Puente del Inca (Fig. 5c) y Valle Hermoso (Fig. 5d) a pesar de estar en la misma zona montañosa de inmediatamente a sotavento. Este echo no solo pone de manifiesto el fuerte aumento hacia el sur de las precipitaciones de alta montaña (distanciadas en  $\sim 2^\circ$  de latitud), sino que probablemente también, refleja una menor disminución y/o una mayor precipitación desbordante en Valle Hermoso que en Puente del Inca, debido a la menor altura de la barrera en  $35^\circ\text{S}$  que en  $33^\circ\text{S}$ . Por el contrario, la precipitación en Valle Hermoso es semejante a la de Lagunitas, ubicada

en una zona cordillerana distinta con precipitaciones incrementadas por ascenso forzado a los  $33^\circ\text{S}$ .

Un aspecto importante de remarcar de la distribución de la precipitación diaria en la región montañosa y baja a barlovento, es que alrededor del 75% del total acumulado durante el invierno es a través de los días pertenecientes al cuarto cuartil (sumar % de percentiles 75-95% y 95-100% de la Tabla IV). Es decir que la mayor parte de la precipitación invernal, representativa a su vez de casi el total anual (a excepción de Malargüe, MAL), es a través de los días y/o eventos de mayor intensidad con solo una frecuencia del 25%. Asimismo, alrededor de un 30-35% es acumulado durante los días y/o eventos extremos dentro del percentil 95-100% (Tabla IV), con una frecuencia cercana a los 15 días en 7 años, lo que representa una media aproximada de 2 días por años. Esta característica en la distribución de las precipitaciones es bastante uniforme en la región, exhibiendo una leve diferencia solo en Valle Hermoso (VHE) con las restantes. El hecho de que no haya diferencias en la distribución entre zonas bajas y alta montaña del sector norte, y una leve diferencia con la del sector sur (VHE), sugiere que es una característica de la precipitación en la región asociada con la latitud, ubicada en una zona de transición subtropical, y no a la orografía.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de la climatología de las precipitaciones invernales en la región Andina Central y en las zonas bajas adyacentes a sotavento y barlovento, se rescatan básicamente dos resultados principales. El primero fue la fuerte influencia de la cordillera alterando los sistemas de precipitaciones de inviernos embebidos en la circulación de los oeste de latitudes medias. Mientras que el segundo fue que el 75% de la acumulación durante el invierno, representativa de alrededor del 90% de la total anual, resultó a través de solo el 25% de frecuencia de días con precipitaciones.

A pesar de las escasas estaciones de montañas disponibles, el campo de precipitación media presentó máximos de precipitación sobre las laderas pendiente arriba de Chile, antes de alcanzar las alturas máximas de la barrera orográfica, y a partir de los cuales se distingue una marcado disminución en dirección transversal a la misma, con precipitaciones altamente reducidas en zonas bajas a

sotavento. Es evidente que los Andes Subtropicales Centrales son lo suficientemente altos para producir dichos máximos de precipitación sobre las laderas pendiente arriba. Este patrón es consistente con el clásico patrón de precipitaciones orográficas sobre las altas cadenas montañosas del mundo [ej. en las Cascades y Sierra Nevada del oeste de U.S.A. (Colle and Mass 2000, Steinhauser 1979), en los Alpes Europeos (Frei y Schar 1998), y sobre los Himalayas (Anders y otros 2004)]; y no sobre o cerca de la cresta de la montaña, como es el caso de las cadenas montañosas más bajas (Roe 2005, Anders y otros 2007). Asimismo, dicho patrón de precipitación orográfica media de invierno es similar al obtenido mediante simulaciones numéricas por Viale y Norte (2009), durante un evento de precipitación intensa. El incremento de la precipitación media encontrado sobre las laderas pendiente arriba de Chile Central (33°-34°S) es un valor semejante al reportado por Falvey y Garreaud (2007). Luego, la fuerte disminución en las zonas inmediatamente a sotavento de los picos más altos, la cual se acentúa a medida que me alejo de la cresta de los Andes, reflejan el fuerte efecto orográfico sobre las precipitaciones generando un formidable gradiente transversal a la topografía, con diferencias de 100 mm o más en menos de 25 km.

Esta disminución de la precipitación observada a partir de la cresta es mayor en el sector norte (32°-34.5°S) que en el sector sur (35°-36.5°S) del área de estudio. La diferencia probablemente radica en la latitud, donde hacia el sur existe un aumento de la actividad de los sistemas de precipitaciones baroclínicos, y también en la diferencia de altura media de la montaña, la cual es menor hacia el sur y permitiría una mayor precipitación desbordante a través de los Andes, como fue observado sobre Malargue. El efecto bloqueante de la barrera de los Andes sobre las precipitaciones de invierno es tan marcado, a tal punto que altera los regímenes de precipitaciones en zonas bajas aledañas. El régimen es casi exclusivamente de invierno en tierras bajas a barlovento, pendiente arriba de la cordillera, y hasta inmediatamente al este de los picos más altos a sotavento, donde alcanza a recibir precipitación desbordante. Mientras que en zonas bajas a sotavento, la reducción de la precipitación de invierno es significativa, y no alcanza a superar el 30-40% de la total anual, por lo cual la lluvia tipo convectiva de verano, influenciada en

gran parte por la orografía también, es la que determina un régimen de precipitación de verano en esta zona subtropical.

Por otro lado, un resultado llamativo fue que la mayor parte de la precipitación invernal es a través de los días de mayor intensidad con solo una frecuencia de ocurrencia del 25%. A su vez, los días con precipitación extrema, dentro del percentil 95-100%, con una frecuencia media de dos días por año acumulan entre el 30-35% del total. Esta característica es igual para las estaciones de montaña y tierras bajas a barlovento, sugiriendo que debería estar asociado a la latitud de la región, ubicada en una zona de transición entre latitudes medias y tropicales, y relativamente más al norte donde normalmente viajan los ciclones extratropicales (Trenberth 1991, Hoskins y Hodges 2005). Este resultado además implica que los eventos de mayor intensidad sean los de mayor impacto en el sistema climático regional, ya sea por el agua que proveen a las zonas bajas aledañas, sino que también por el impacto negativo de bloquear por varios días los caminos a través de la cordillera, con consecuencias en el comercio y transporte, entre otros.

Los resultados de este estudio generan nuevos cuestionamientos y preguntas, entre los cuales se puede mencionar los siguientes: ¿Existen diferencias en la distribución espacial entre un caso a otro de precipitación en los Andes, y a su vez, diferencias con el patrón de precipitación orográfica media? ¿Cómo serían las precipitaciones en la zona baja a sotavento de Argentina sin la presencia de la cordillera?

*Agradecimientos:* Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y al Dr. Rene Garreaud por la provisión de las series diarias de precipitación de Argentina y Chile, respectivamente. Agradecemos también al Dr. Mariano Masiokas por el aporte de información nivológica en estaciones de alta montaña. Al Dr. Diego Araneo por la ayuda computacional de cálculo aplicado en este estudio. Este trabajo fue financiado por el subsidio CONICET – PIP 112-200801-00195.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anders, A.M., G.H. Roe, B. Hallet, D.R. Montgomery, N. Finnegan, and J. Putkonen, 2006: Spatial patterns of precipitation and topography in the Himalaya. S.D. Willett, N. Hovius, M. Brandon,

- D.M. Fisher, (Eds), *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution: Geological Society of America Special Paper 398*, Geological Society of America, Boulder, CO, 39-53.
- Anders, A.M., G.H. Roe, D.R. Durran, and J.R. Minder, 2007: Small-scale spatial gradients in climatological precipitation on the Olympic Peninsula. *J. Hydrometeorology*, 8, 1068-1081.
- Colle, B., and C. F. Mass, 2000: The 5-9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: sensitive studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 593-617.
- Compagnucci, R. H, y W. Vargas, 1998: Interannual variability of the Cuyo river's streamflow in the Argentinean Andean mountains and ENSO events. *Int. J. Climatol.*, 18, 1593-1609.
- Compagnucci R. H. y Araneo D. C., 2005: Identificación de áreas de homogeneidad estadística para los caudales de ríos andinos Argentinos y su relación con la circulación atmosférica y la temperatura superficial del mar. *Meteorológica*, 30, 41-55.
- Ereño C. E. y J. Hoffman, 1978: El régimen pluvial en la Cordillera Central. Series de Cuadernos de Geografía, Vol. 5, Facultad de Filosofía y Letras—Universidad de Buenos Aires, 17pp.
- Falvey, M., and R. Garreaud, 2007: Wintertime precipitation episodes in Central Chile: associated meteorological conditions and orographic influences. *J. Hydrometeorology*, 8, 171-193.
- Frei, C., and Schär C., 1998: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution raingauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900.
- Glossary of Meteorology, 2000. Ed. American Meteorology Society (AMS), 354 pag.
- Hoffman, J. A. J., 1975: Atlas Climático de América del Sur. Parte I: Mapas de temperatura y precipitación media. WMO.
- Hoskins, B. J., y K. I. Hodges, 2005: A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *J. Climate*, 18, 4108-4129.
- Masiokas, M. H., R. Villalba, B. H. Luckman, C. Le Quesne, y J. C. Aravena, 2006: Snowpack variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale Atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J. Climate*, 19, 6334-6352.
- Miller, A., 1976: The climate of Chile. World Survey of Climatology, W. Schwerdtfeger, Ed., 12, Elsevier, 113-130.
- Prohaska, F., 1976: The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. World Survey of Climatology, W. Schwerdtfeger, Ed., 12, Elsevier, 13-73.
- Roe, G. H., 2005: Orographic precipitation. *An. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 645-671.
- Servicio Meteorológico Nacional (1958): Instrucciones Nivelógicas. Ministerio de Aeronáutica, República Argentina. Publicaciones A2 N°1.
- Servicio Meteorológico Nacional (1984): Pluviometría. Fuerza Aérea Argentina, República Argentina. Instrucción 1.
- Sinclair, M. R., D. S. Wratt, R. D. Henderson, and W. R. Gray, 1997: Factors affecting the distribution and spillover of precipitation in the Southern Alps of New Zealand—A case study. *J. Appl. Meteor.*, 36, 428-442.
- Steinhauser, F., 1979: Atlas Climático de América del Norte y Centro. WMO.
- Trenberth, K. E., 1991: Storm tracks in Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 48, 2159-2178.
- Viale, M. y F. A. Norte, 2009: Strong cross-barrier flow under stable conditions producing intense winter orographic precipitation: A case study over Subtropical Central Andes. *Wea. Forecasting*, 24, 1009-1031.
- Wratt, D.S., Revell M.J., Sinclair M.R., Gray W.R., Henderson R.D., Chater A.M., 2000: Relationships between air mass properties and mesoscale rainfall in New Zealand's Southern Alps. *Atmos. Res.*, 52, 261-282.

## Lista de Figuras y Tablas

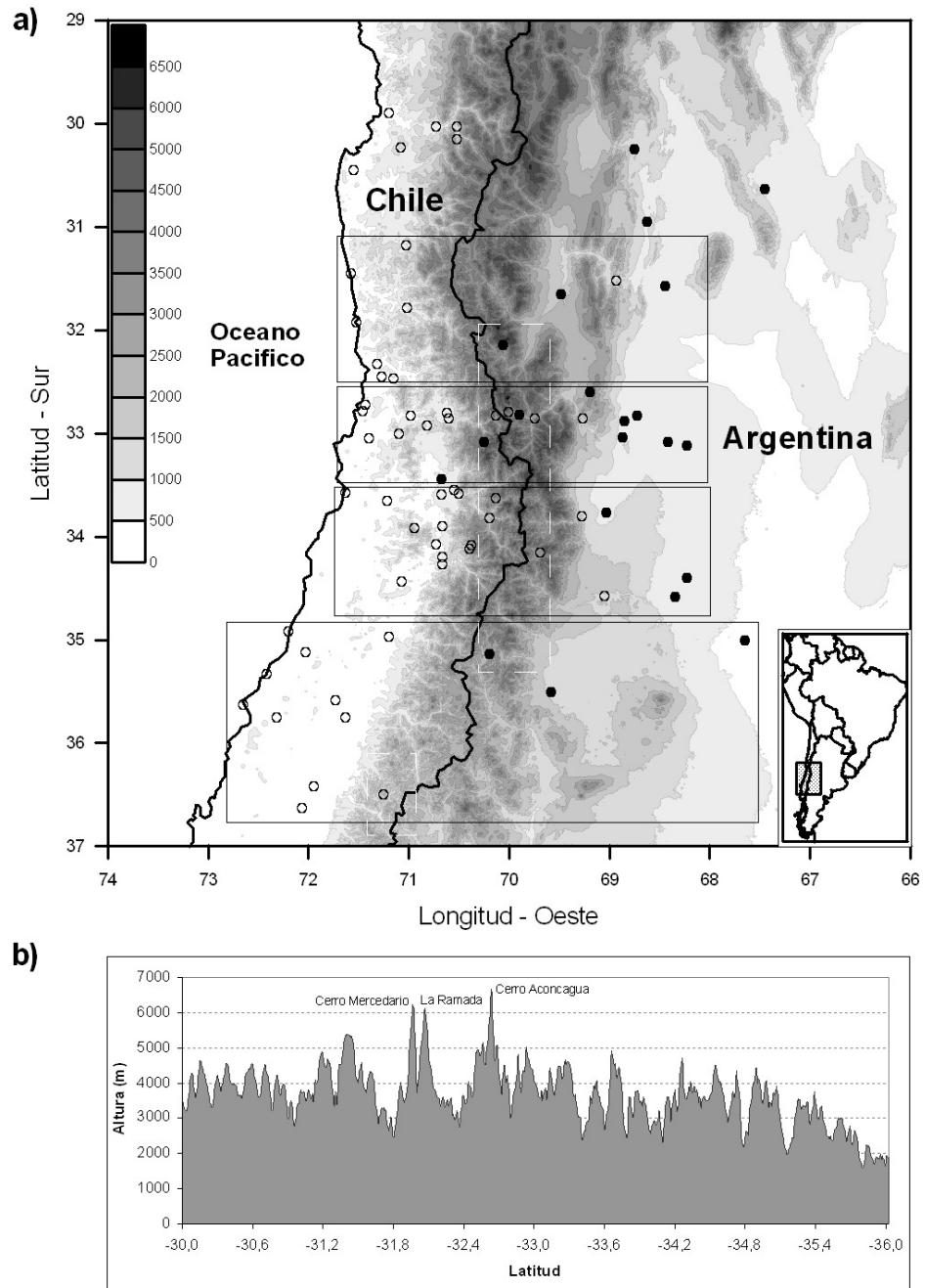


Figura 1: (a) Mapa topográfico del área de estudio (altitud sombreada cada 500 m) y estaciones pluviométricas (círculos negros llenos y vacíos representan estaciones con información diaria y mensual respectivamente). Las estaciones dentro del rectángulo vertical con líneas discontinuas blancas corresponden a estaciones de montañas (i.e., altitud > 2000m); mientras que las encerradas por los rectángulos horizontales con líneas continuas grises corresponden a estaciones utilizadas para los cortes transversales a los Andes de la precipitación en la Figura 3. (b) Corte latitudinal de la barrera orográfica a lo largo del meridiano 70°O (aproximadamente representativo de las alturas máximas). Datos topográficos obtenidos de la U.S.Geological Service con una resolución horizontal ~1km.

Estación	ID	Lat.(S)	Lon.(O)	Altura (m)	Fuente	Faltantes (%)
<b>Portillo</b>	<b>POR</b>	<b>-32.83</b>	<b>-70.12</b>	<b>3000</b>	<b>DGA (Mensual)</b>	<b>0</b>
<b>Lagunitas</b>	<b>LAG</b>	<b>-33.08</b>	<b>-70.25</b>	<b>2765</b>	<b>CEMA</b>	<b>0</b>
Quinta Normal	QTN	-33.57	-70.68	520	DMC	0
<b>Laguna Negra</b>	<b>LGN</b>	<b>-33.63</b>	<b>-70.13</b>	<b>2768</b>	<b>DGA (Mensual)</b>	<b>0</b>
<b>Sewell</b>	<b>SEW</b>	<b>-34.08</b>	<b>-70.38</b>	<b>2154</b>	<b>GHNC (Mensual)</b>	<b>0</b>
<b>Volcan Chillan</b>	<b>VCH</b>	<b>-36.50</b>	<b>-71.25</b>	<b>2400</b>	<b>DGA (Mensual)</b>	<b>0</b>
Jachal	JAC	-30.25	-68.75	1165	SMN	0
Valle Fertil	VFE	-30.63	-67.45	857	SMN (Desactivada)	2,4
El Balde	BAL	-30.95	-68.63	928	SMN. (Desactivada)	0
San Juan Aero II	SJA	-31.57	-68.45	598	SMN	0
Barreal Aero Club	BAR	-31.65	-69.48	1750	SMN (Desactivada)	20
<b>Valle De Los Patos</b>	<b>VPA</b>	<b>-32.14</b>	<b>-70.06</b>	<b>2880</b>	<b>SMN (Desactivada)</b>	<b>4,8</b>
Uspallata	USP	-32.60	-69.20	1891	SMN	0
<b>Tunel Internacional</b>	<b>TUN</b>	<b>-32.79</b>	<b>-70.01</b>	<b>3250</b>	<b>DGI (Mensual)</b>	<b>0</b>
<b>Puente Del Inca</b>	<b>PIN</b>	<b>-32.82</b>	<b>-69.90</b>	<b>2720</b>	<b>SMN (Desactivada)</b>	<b>0</b>
<b>Punta de Vacas</b>	<b>PVA</b>	<b>-32.85</b>	<b>-69.75</b>	<b>2225</b>	<b>DGI (Mensual)</b>	<b>0</b>
<b>Cristo Redentor</b>	<b>CRI</b>	<b>-32.83</b>	<b>-70.06</b>	<b>3832</b>	<b>SMN (Desactivada)</b>	<b>10</b>
Mendoza Aero	MZA	-32.83	-68.73	704	SMN	0
Mendoza Observatorio	OBS	-32.88	-68.85	827	SMN	0
Chacras De Coria	CHA	-33.04	-68.87	921	SMN-Univ.de Cuyo	0
San Martin (Mza)	SMA	-33.08	-68.42	653	SMN	0
Junin	JUN	-33.12	-68.23	653	INTA (Desactivada)	0
San Carlos (Mza)	SCA	-33.77	-69.03	940	SMN	2,3
<b>Laguna Diamante</b>	<b>LGD</b>	<b>-34.15</b>	<b>-69.69</b>	<b>3310</b>	<b>DGI (Mensual)</b>	<b>0</b>
San Rafael Aero	SRA	-34.40	-68.23	748	SMN	0
Rama Caída	RMC	-34.58	-68.35	692	INTA	0
Colonia Alvear	ALV	-35.50	-69.58	465	SMN (Desactivada)	2,4
Malargue Aero	MAL	-35.14	-70.20	1425	SMN	0
<b>Valle Hermoso</b>	<b>VHE</b>	<b>-35.00</b>	<b>-67.65</b>	<b>2293</b>	<b>SMN (Desactivada)</b>	<b>0</b>

Tabla I: Estaciones meteorológicas con información de precipitación diaria y de alta montaña (en negrita) utilizadas durante el periodo invernal (Abr-Sep) 1970-1976. La línea horizontal divide las estaciones ubicadas a barlovento y sotavento de los Andes, respectivamente. Las estaciones en negro más intenso son de alta montaña (i.e., altitud > 2000m).



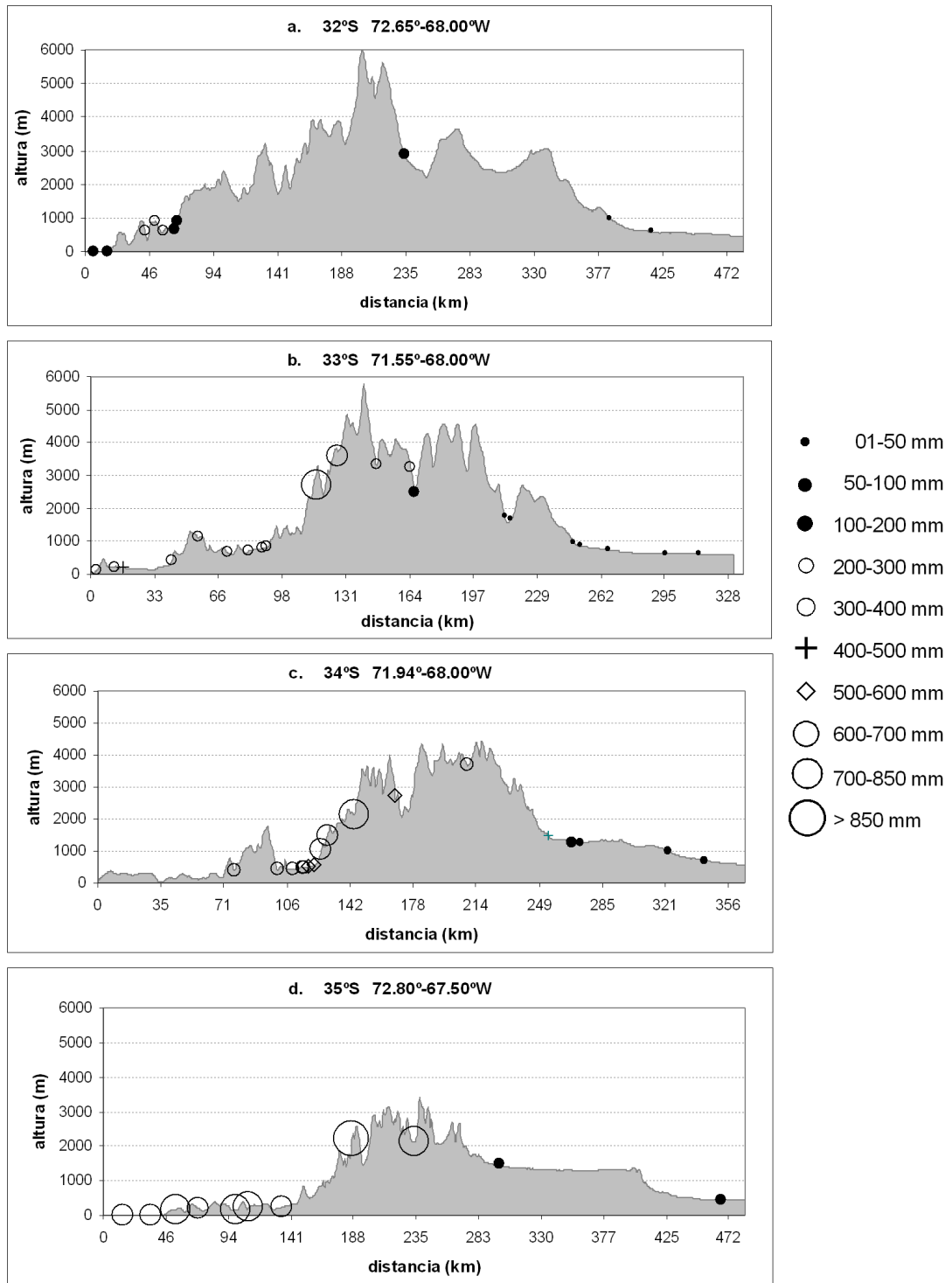


Figura 3: Corte transversales a la cordillera de los Andes de la precipitación media de invierno (Abr-Sep) durante el periodo 1970-1976 para diferentes bandas latitudinales: (a) 31.15°-32.45°O, (b) 32.45°-33.50°O, (c) 33.50°-34.50°O y (d) 34.60°-36.5°O. Los perfiles topográficos son realizados mediante los datos de la USGS a lo largo del paralelo central de cada banda latitudinal, y a su vez, estos son representativos de la latitud aproximada de las estaciones de montaña de cada banda.

Banda Latitudinal	Precipitación Areal (mm) en cada Zona Cordillerana				Tasa de Incremento	Tasa de Reducción	
	<b>1</b> Zona baja Barlovento	<b>2</b> Zona pendiente arriba	<b>3</b> Inmediatamente al Este divisoria	<b>4</b> Zona baja Sotavento	$\frac{\text{Zona 2}}{\text{Zona 1}}$	$\frac{\text{Zona 2}}{\text{Zona 3}}$	$\frac{\text{Zona 1}}{\text{Zona 4}}$
32° S	198 (7)	-	170 (1)	10.5 (2)	-	-	19
33° S	278 (9)	714 (1)	281 (3)	30 (6)	2.6	2.5	9.2
34° S	458 (13)	747 (1)	399 (1)	78 (5)	1.6	1.7	5.9
35.5° S	697 (8)	913 (1)	795 (1)	138 (2)	1.3	1.1	5.1

*Tabla II: Promedio areal de la precipitación para diferentes zonas cordilleranas, y tasas de reducción de la precipitación al este de línea divisoria para cada banda latitudinal de la Figura 3. Los números entre paréntesis representan la cantidad de estaciones disponibles para el cálculo del promedio areal (ver también Figura 1).*

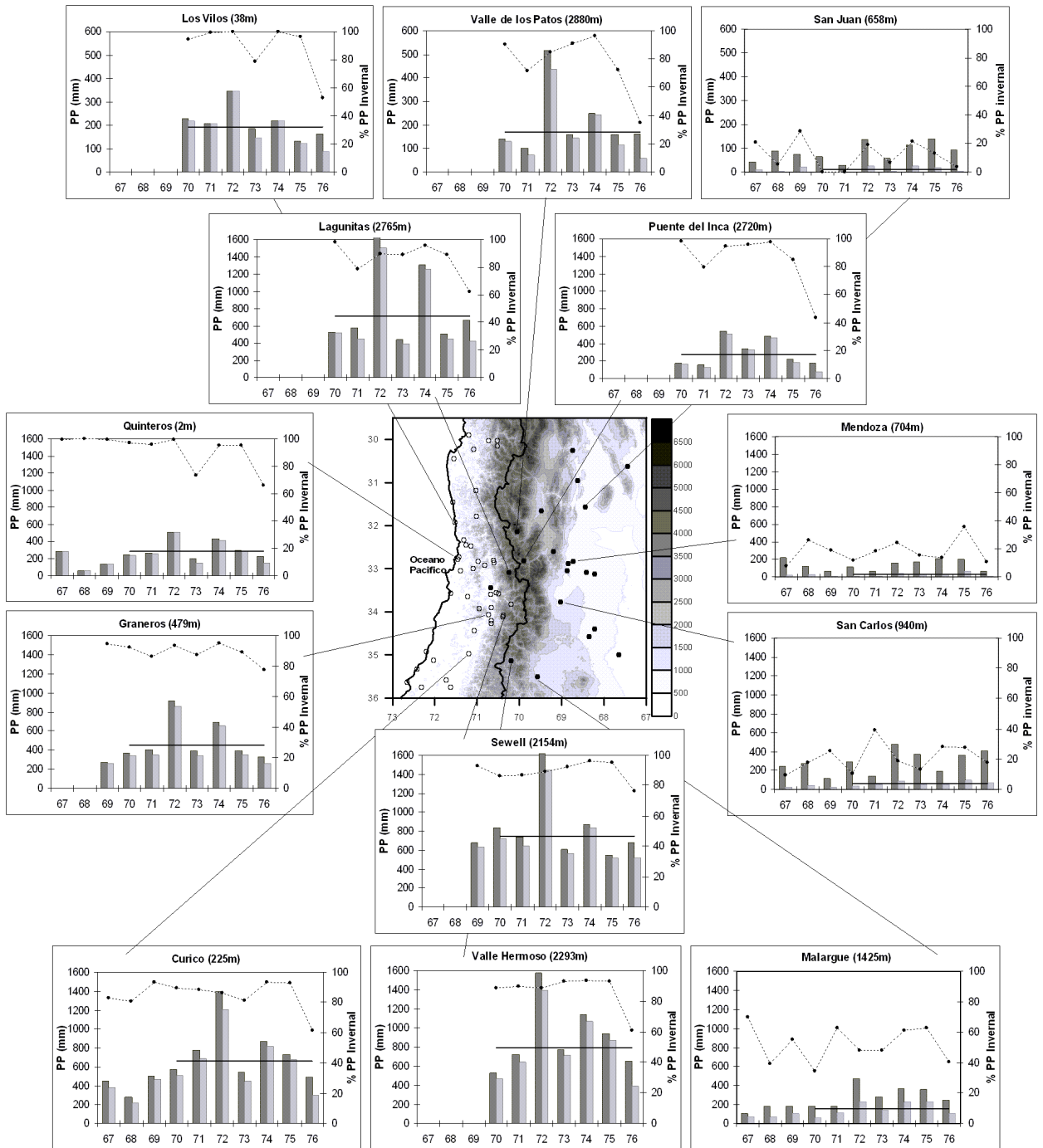


Figura 4: Precipitaciones de invierno (barra gris claro) y anuales (barra gris oscuro) disponibles dentro del periodo 1967-1976. La línea negra recta representa la precipitación de invierno media para el periodo unificado a todas las estaciones 1970-1976. La línea discontinua de puntos indica el porcentaje que representa la precipitación de invierno sobre la total anual. Las estaciones seleccionadas son representativas de las regiones alta montaña y tierras bajas adyacentes a sotavento y barlovento de la cordillera sobre diferentes bandas latitudinales.

	QTN	LAG	VPA	PIN	CRI	VHE	MAL	SRF	RMC	ALV	SCA	CHA	MZA	OBS	SMA	JUN	USP	JAC	VFE	BAL	SJA		
QTN	1,00	0,17	0,28	0,23	0,14	0,33	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
LAG	0,17	1,00	0,31	0,54	0,17	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
VPA	0,28	0,31	1,00	0,46	0,25	0,22	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PIN	0,23	0,54	0,46	1,00	0,24	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CRI	0,14	0,17	0,25	0,24	1,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
VHE	0,33	0,32	0,22	0,34	0,04	1,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAL	0,20	0,00	0,05	0,00	0,00	0,36	1,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SRF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,87	0,66	0,32	0,32	0,16	0,16	0,51	0,67	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
RMC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	1,00	0,67	0,49	0,31	0,25	0,11	0,59	0,63	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
ALV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,67	1,00	0,54	0,24	0,24	0,08	0,68	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SCA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,32	0,49	0,54	1,00	0,31	0,30	0,01	0,53	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CHA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,31	0,24	0,31	1,00	0,26	0,42	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MZA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,25	0,24	0,30	0,26	1,00	0,41	0,62	0,58	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OBS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,11	0,08	0,01	0,42	0,41	1,00	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,57	0,65	0,50	0,00	0,59	0,00	1,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
JUN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,65	0,72	0,59	0,15	0,61	0,09	0,94	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
USP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
JAC	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
VFE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,06	0,06	0,06	0,06
BAL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	1,00	0,32	0,32	0,32
SJA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,32	1,00	1,00	1,00

Tabla III: Matriz del índice lineal de correlaciones corregidas ( $\tilde{r}$ , ver texto) entre las series de precipitaciones diarias de invierno (Abr-Sep) durante 1970-1976. El valor superior a cero esta en rojo y es significativo con el 95% de confianza, los valores iguales a cero representan las correlaciones no significativas. Los nombres de las estaciones ubicadas a barlovento y en alta montaña están escritos con letras verdes, y a sotavento en azul.

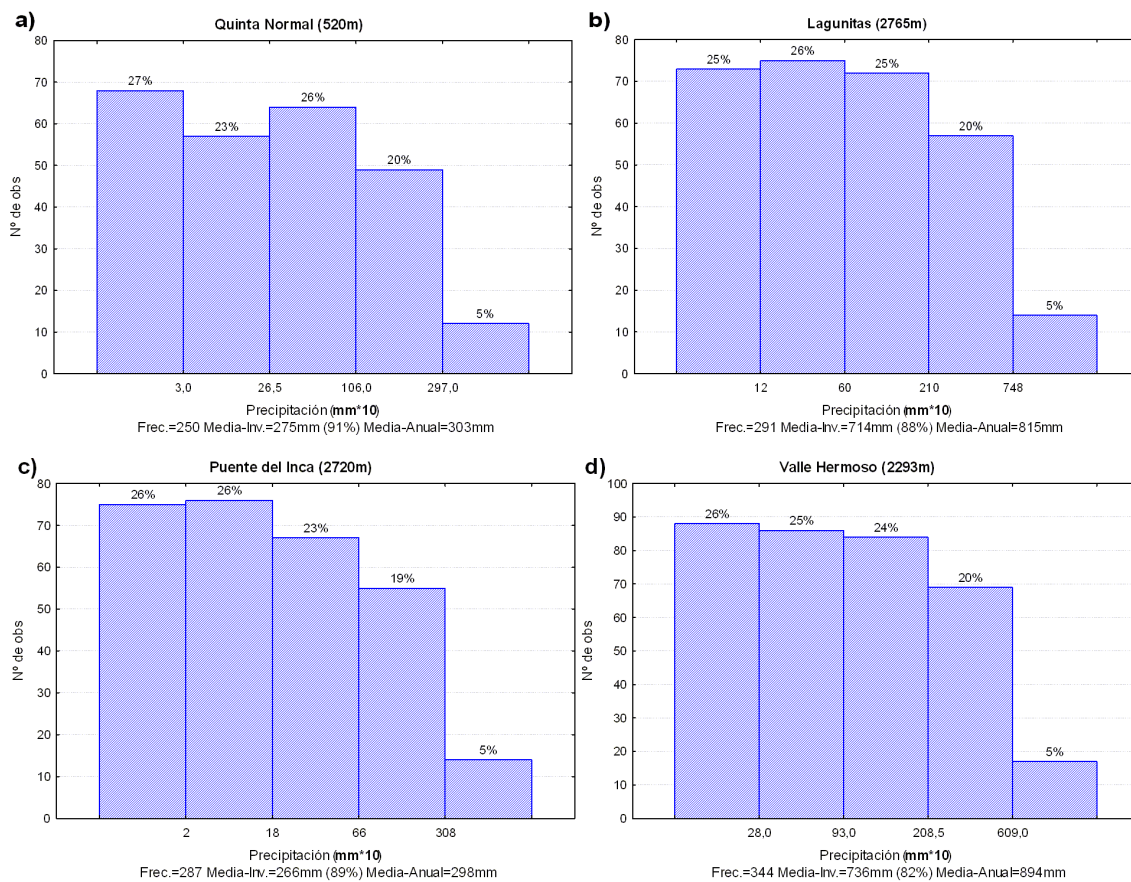


Figura 5: Histogramas de precipitaciones para (a) Quinta Normal, (b) Lagunitas, (c) Puente del Inca y (d) Valle Hermoso. La estación (a) es representativa de la región de tierras bajas a barlovento, mientras que (b), (c) y (d) lo son de la región de alta montaña.

Estac	Percentil	Frec	Med-Inv	Med-Día	%
QTN	0-75%	187	64,1	2,4	23,3
	75-95%	50	127,0	17,8	46,2
	95-100%	13	84,1	45,3	30,6
	<b>Total</b>	<b>250</b>	<b>275,2</b>	<b>7,7</b>	<b>100</b>
LAG	0-75%	217	152,1	4,9	21,3
	75-95%	59	312,2	37,0	43,7
	95-100%	15	249,3	116,3	34,9
	<b>Total</b>	<b>291</b>	<b>713,6</b>	<b>17,2</b>	<b>100</b>
VPA	0-75%	158	47,6	2,1	27,9
	75-95%	40	104,1	18,2	61,1
	95-100%	11	47,8	30,4	28,1
	<b>Total</b>	<b>212</b>	<b>170,5</b>	<b>5,6</b>	<b>100</b>
PIN	0-75%	214	45,8	1,5	17,2
	75-95%	58	127,5	15,4	48,0
	95-100%	15	92,6	43,2	34,8
	<b>Total</b>	<b>287</b>	<b>265,9</b>	<b>6,5</b>	<b>100</b>
VHE	0-75%	258	249,6	6,8	31,4
	75-95%	68	354,0	36,4	44,5
	95-100%	18	191,1	74,3	24,0
	<b>Total</b>	<b>344</b>	<b>794,6</b>	<b>16,2</b>	<b>100</b>
MAL	0-75%	162	36,2	1,6	22,7
	75-95%	44	73,9	11,7	46,4
	95-100%	11	49,1	31,2	30,9
	<b>Total</b>	<b>217</b>	<b>159,2</b>	<b>5,1</b>	<b>100</b>

Tabla IV: Parámetros estadísticos de las series de precipitación con régimen invernal para diferentes percentiles y el total de la serie. Frecuencia (días durante todo el periodo 1970-1976), Media invernal (mm/invierno) y diaria (mm/día), y porcentaje de la precipitación acumulada para cada percentil con respecto a la total. Las estaciones son: Quinta Normal (QTN), Lagunitas (LAG), Valle de los Patos (VPA), Puente del Inca (PIN), Valle Hermoso (VHE) y Malargöe (MAL).