

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA LÍNEA DE NIEVES  
DURANTE EVENTOS DE TORMENTA ENTRE LOS 28,5° Y 46,5° LS**

**FERNANDO COVIÁN G.<sup>1</sup>**  
**LUDWIG STOWHAS B.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Se seleccionaron un total de 17 estaciones hidrometeorológicas ubicadas en zonas próximas a la Cordillera de Los Andes, entre los 28,5 a 46,5 grados de latitud sur, realizando en cada una de ellas un análisis de frecuencia de las temperaturas representativas del aire (temperaturas índices) durante los eventos de tormenta, para tres temporadas del año: Invierno, Otoño – Primavera y Verano, determinando para cada temporada y estación, las temperaturas índices en función de su probabilidad de excedencia, ajustando funciones de densidad de frecuencia en base a ensayos de bondad de ajuste. Adoptando un gradiente de temperaturas en función de la altura correspondiente a un gradiente pseudo adiabático húmedo, se determina la cota correspondiente a la línea de nieves o cota a la cual se ubica la temperatura umbral que separa entre la precipitación líquida y la precipitación sólida, determinando de esta manera su variabilidad en términos probabilísticos. Para la temperatura índice umbral se adopta el valor 0,9°C. Se comparan los resultados con estudios similares anteriores, además de analizar la ubicación de la línea de nieve en función de la naturaleza convectiva o ciclónica de las precipitaciones. El presente paper corresponde a una optimización del trabajo de título efectuado por Covián (2012).

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Universidad Federico Santa María – [fernandocovian@hotmail.com](mailto:fernandocovian@hotmail.com)

<sup>2</sup> Profesor, Depto. de Obras Civiles, Universidad Santa María – [ludwig.stowhas@usm.cl](mailto:ludwig.stowhas@usm.cl)

## **MODELACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA LÍNEA DE NIEVES**

### **DURANTE EVENTOS DE TORMENTA ENTRE LOS 28,5° Y 46,5° LS**

#### **1.- GENERALIDADES**

La literatura técnica de hidrología señala diversos métodos para estimar los caudales de crecidas en cuencas de tipo pluvial, es decir en cuencas donde toda la precipitación que cae es de tipo líquida, siendo las principales pérdidas la infiltración que ocurre en los suelos de las cuencas.

No obstante, para cuencas de tipo mixto, en donde los aportes de precipitaciones son de tipo pluvial y nival, se requiere definir el área aportante o área pluvial de la cuenca, por lo cual es necesario estimar la línea de nieves de la cuenca de interés.

La línea de nieves corresponde a la cota umbral, medida desde el nivel medio del mar, que separa la precipitación líquida de la precipitación sólida, siendo esta principalmente función de la temperatura del aire representativa de la época de tormenta o temperatura índice.

En las cuencas mixtas la estimación de la línea de nieves constituye una variable de gran relevancia en la generación de los caudales de crecida. Esto se debe principalmente al aumento de su cota en aproximadamente 200 [m] por cada grado de aumento de temperatura durante la tormenta, de acuerdo Peña & Vidal (1993), lo cual infiere en un cambio relevante en el área pluvial de la cuenca.

El presente estudio realiza un estudio probabilístico de la línea de nieves en la zona centro sur de Chile, en función de la probabilidad de excedencia y la época del año.

#### **2.- RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES**

##### **Determinación de la Temperatura Umbral**

La temperatura umbral corresponde a la temperatura límite que separa las precipitaciones de tipo líquido con respecto a las precipitaciones de tipo sólido.

Para los propósitos de este trabajo, se adoptará como temperatura umbral la temperatura estimada en el estudio de Seguel & Stowhas (1985), en el cual se analizaron las temperaturas extremas en la estación de Lagunitas, ubicada en la V Región de Chile (33°04'), separando los eventos con precipitación sólida, líquida y mixta.

En dicho estudio se estableció que la temperatura máxima diaria registrada para eventos con precipitación sólida es de 1,0 [°C], en cambio la temperatura mínima diaria registrada para eventos con precipitación líquida es de 0,8 [°C]; ante lo cual se adoptó una temperatura umbral correspondiente a 0,9 [°C].

Cabe agregar que dicho valor es bastante consistente con el estimado en un estudio reciente, efectuado por Lagos (2013).

### **Estimación de las Temperaturas Índices.**

La ubicación de línea de nieves depende principalmente de la temperatura de la precipitación que cae, la cual debiera aproximarse a la temperatura de bulbo húmedo del aire que atraviesa, valor que es variable durante la duración de los eventos de tormenta.

Considerando que generalmente sólo se posee información sobre las temperaturas extremas diarias, Seguel & Stowhas (1985) establecieron la siguiente expresión para determinar las temperaturas índices:

$$T_I = \frac{1}{k} * (T_{max} + (k - 1) * T_{min}) \quad (1)$$

Donde  $3 \leq k \leq 7$ .

Aun cuando se han reportado valores de k cercanos a 4 a partir de observaciones satelitales posteriores a las tormentas, para los propósitos de este trabajo, se adoptó el valor  $k = 7$  sugerido en el estudio de Seguel & Stowhas (1985), equivalente a una temperatura índice más cercana a la mínima, lo cual está en concordancia con el supuesto de una atmósfera saturada con una temperatura cercana a la temperatura del punto de rocío.

El estudio de Peña & Vidal (1993) utilizó como temperatura índice la temperatura mínima diaria.

### **Discretización de las Épocas del Año.**

Siguiendo el criterio adoptado en el estudio de Seguel & Stowhas (1985), se dividió el año hidrológico en tres épocas, con objeto de representar mejor la variación estacional de la línea de nieves. Las épocas fueron las siguientes:

- Época de Inviernos: Meses entre Mayo a Septiembre.
- Época de Otoño – Primavera: Abril, Octubre y Noviembre.
- Época de Verano: Meses entre Diciembre a Marzo.

## **3.- DESARROLLO DEL MODELO PROBABILÍSTICO**

### **Estaciones Seleccionadas**

Para analizar el comportamiento de la temperatura índice se escogió un total de 17 estaciones hidro-meteorológicas en zonas próximas a la Cordillera de Los Andes, siendo 12 de ellas estaciones correspondientes a estaciones utilizadas en el estudio de Peña & Vidal (1993), 3 estaciones adicionales utilizadas en el estudio de Covián (2012), a las se agrega la estación de Chile Chico, ubicada en la XI región, efectuándose una extensión territorial del modelo, en comparación a los trabajos anteriores.

En concordancia con la anteriormente expuesto, se adoptó como temperatura umbral un valor de  $0,9 [^{\circ}\text{C}]$ , la discretización del año hidrológico en tres períodos estacionales y las temperaturas índices se estimaron de acuerdo a la fórmula (1).

En cuanto a los eventos de precipitación, se consideraron sólo los días en que la precipitación fuese superior a  $10 [\text{mm}]$ , con excepción de la zona norte y Chile Chico para

la época de otoño-primavera y verano, en que se aceptaron valores con precipitaciones superior a 5 [mm] para las estaciones de Conay, Hurtado, Rivadavia y Chile Chico, en concordancia con los estudios de Peña & Vidal (1993) y Covián (2012).

Las estaciones seleccionadas se indican en la Tabla 1, recopilándose información referente a precipitaciones y temperaturas extremas diarias, gracias a la gentileza del CIRH de la DGA, además de recopilación de estudios elaborados por 4C Ingenieros Limitada:

Estación	Latitud Sur	Elevación [msnmm]	Registro [Años]	Número de Eventos		
				Invierno	Otoño	Verano
Conay	28°58'	1450	28	48	12	7
Rivadavia	29°58'	850	37	107	14	4
Hurtado	30°17'	1100	30	118	10	5
La Tranquilla	31°54'	1000	43	276	30	20
Hacienda Alicahué	32°20'	835	41	284	64	14
Vilcuya	32°51'	1100	44	407	55	28
Lagunitas	33°04'	2765	15	273	36	34
Pirque	33°40'	670	31	N/A	N/A	23
Embalse El Yeso	33°41'	2475	31	343	59	40
Las Melosas	33°53'	1527	17	292	62	24
Convento Viejo	34°46'	250	38	688	99	40
Colorado	35°38'	420	40	1148	206	76
Diguillín	36°52'	670	44	1788	467	226
Quilaco	37°40'	225	44	1595	420	219
Pucón	39°16'	230	24	1058	373	262
La Ensenada	41°13'	62	10	398	166	148
Chile Chico	46°33'	215	8	55	11	16

*Nota: La estación de Pirque solo se utilizó para analizar la línea de nieves en verano.*

**Tabla 1 Estaciones Hidrometeorológicas seleccionadas.**

### **Correlación entre Magnitud de Precipitaciones y Temperaturas Índices.**

Al igual que en los estudios de Seguel & Stowhas (1985) y de Covián (2012), se procedió a verificar la independencia entre magnitud de precipitaciones y temperaturas índices, la cual fue corroborada, ya que los coeficientes de correlación entre ambas variables oscilaron entre -0.239 y +0,265, tendiendo a ser negativos en la zona norte y positivos en la zona sur del país.

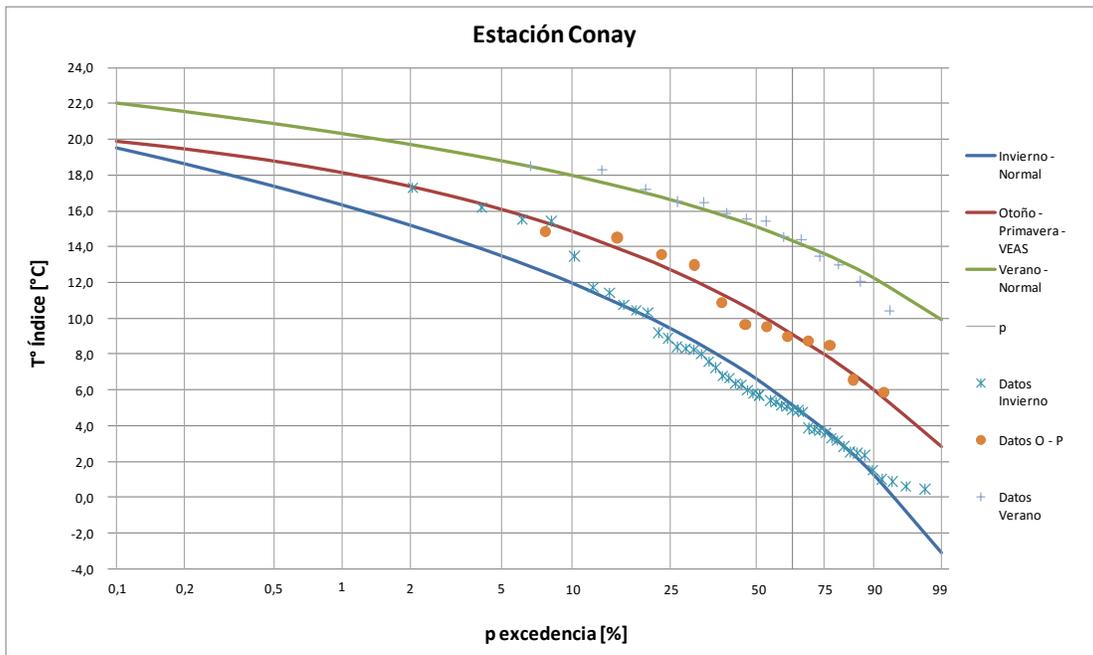
### **Temperaturas Índices en Función de la Probabilidad de Excedencia.**

En base a la estadística seleccionada, se procedió a desarrollar un análisis de frecuencia de las temperaturas índices, utilizando para cada época de año, 8 distribuciones teóricas de probabilidad y efectuando un análisis de bondad de ajuste de Smirnov – Kolgomorov, además de cumplir con los siguientes criterios:

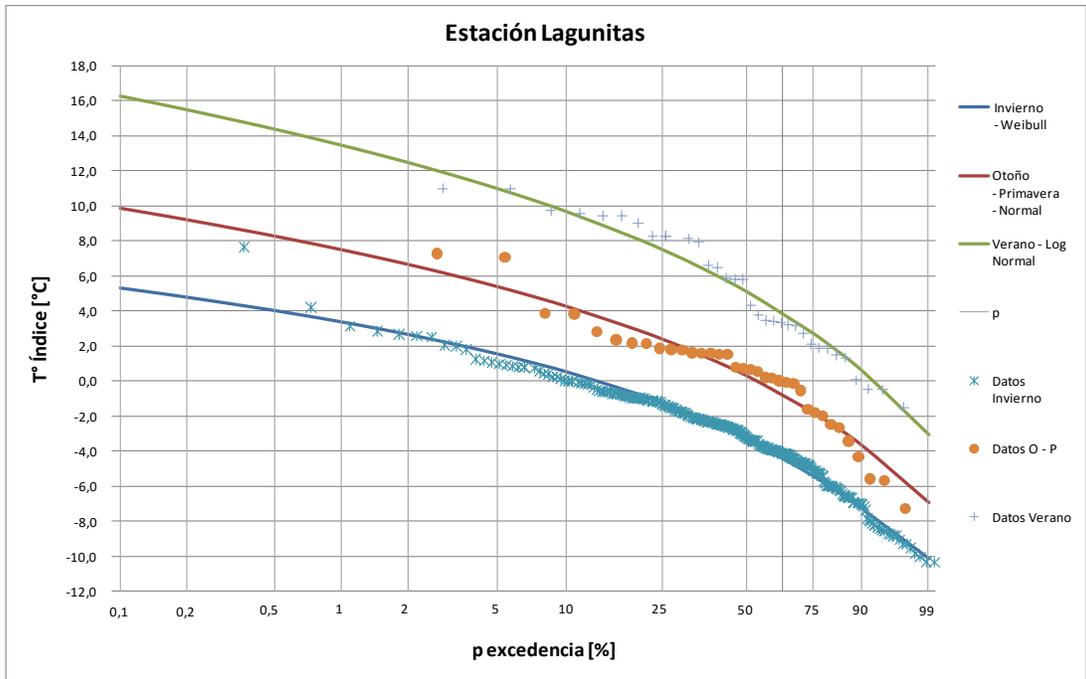
- Representar adecuadamente las probabilidades empíricas de excedencia extremas, ya que la gran mayoría de la estaciones poseen aproximadamente entre 30 a 40 años de estadística de temperaturas diarias.

- Las curvas de frecuencia acumulada para las épocas de “Invierno”, “Otoño – Primavera” y “Verano” no debieran cruzarse; la curva de invierno debe ser una envolvente inferior y la curva de verano debe ser una envolvente superior.
- Se procura que las curvas mantengan un cierto paralelismo entre ellas, reflejando así una mayor homogeneidad entre las mismas curvas.

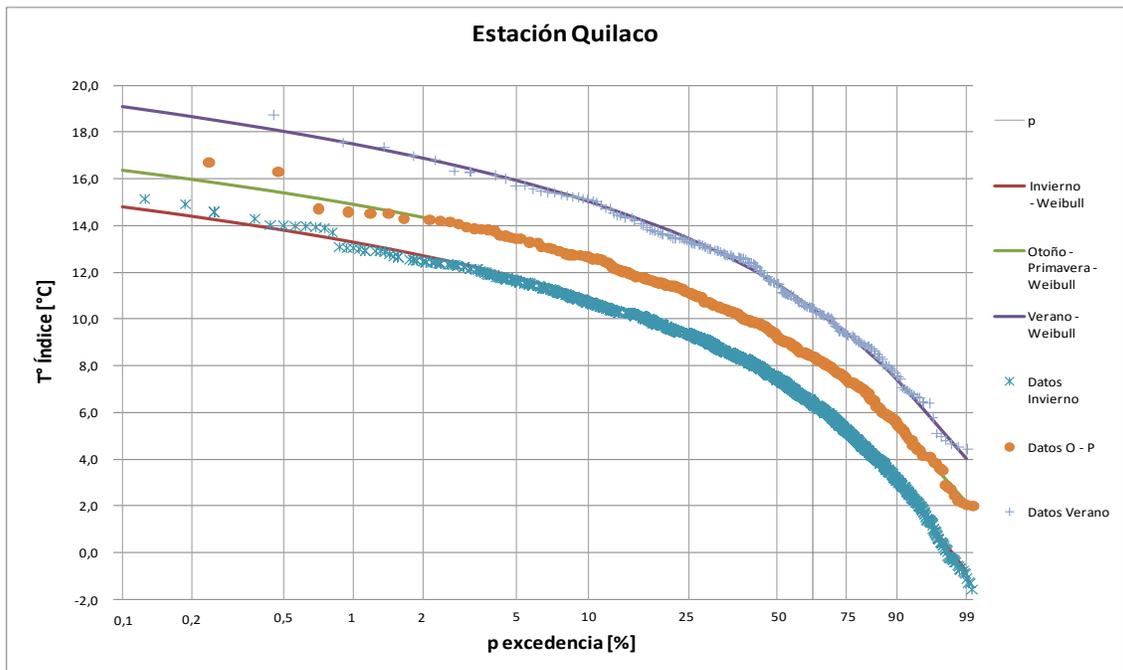
Los resultados obtenidos para algunas estaciones se presentan en las siguientes figuras, donde cada gráfico se presenta en un papel de probabilidades de tipo Gumbel – Powell. Los resultados para todas las estaciones, se pueden obtener en el trabajo de Covián (2012), siendo estos similares a los aquí presentados.



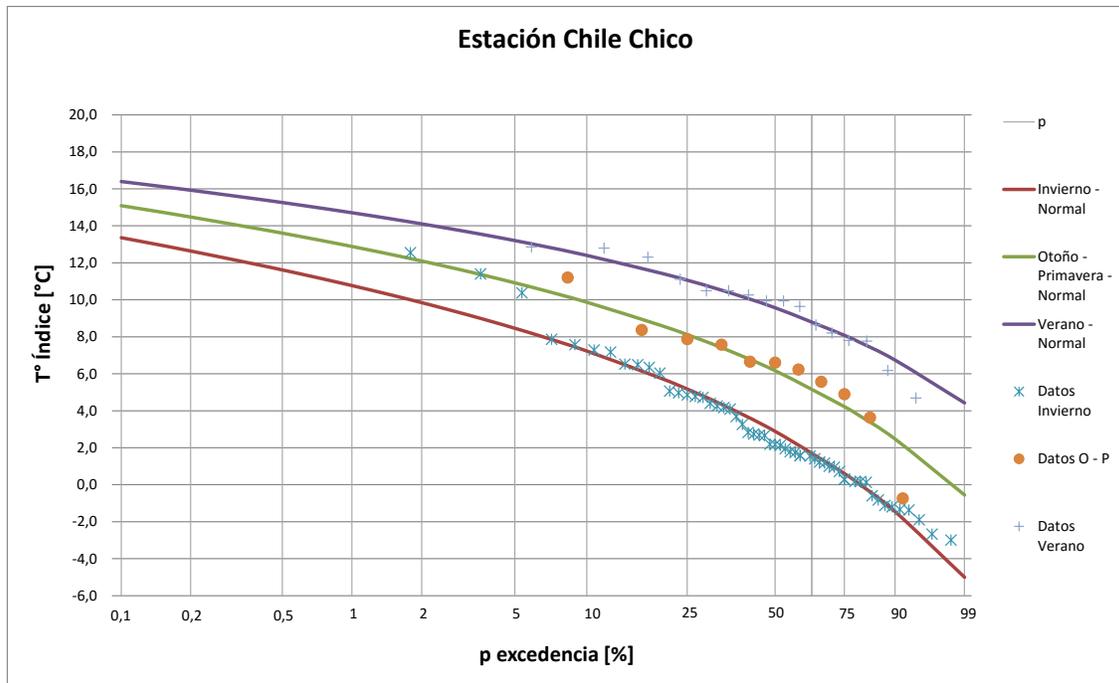
**Gráfico 1:** Temperatura Índice versus p. excedencia para Conay.



*Gráfico 2: Temperatura Índice versus p excedencia para Lagunitas.*



*Gráfico 3: Temperatura Índice versus p. excedencia para Quilaco.*



**Gráfico 1:** Temperatura Índice versus p excedencia para Chile Chico.

## Modelación de la Línea de Nieves.

### Gradientes de temperatura

Obtenida la temperatura índice en función de la probabilidad de excedencia, se procedió a obtener la línea de nieves de acuerdo al gradiente de temperatura variable correspondiente a una atmósfera pseudo adiabática húmeda, la cual corresponde a las condiciones que se generan en la atmósfera durante los eventos de tormenta de magnitud importante, y que se pueden estimar a través de la siguiente expresión:

$$\Gamma_s = \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} * \left( \frac{1 + \frac{L * \omega_s}{R_d * T}}{1 + \frac{\epsilon * L^2}{C_p * R_d} * \frac{\omega_s}{T^2}} \right) \quad (2)$$

Donde

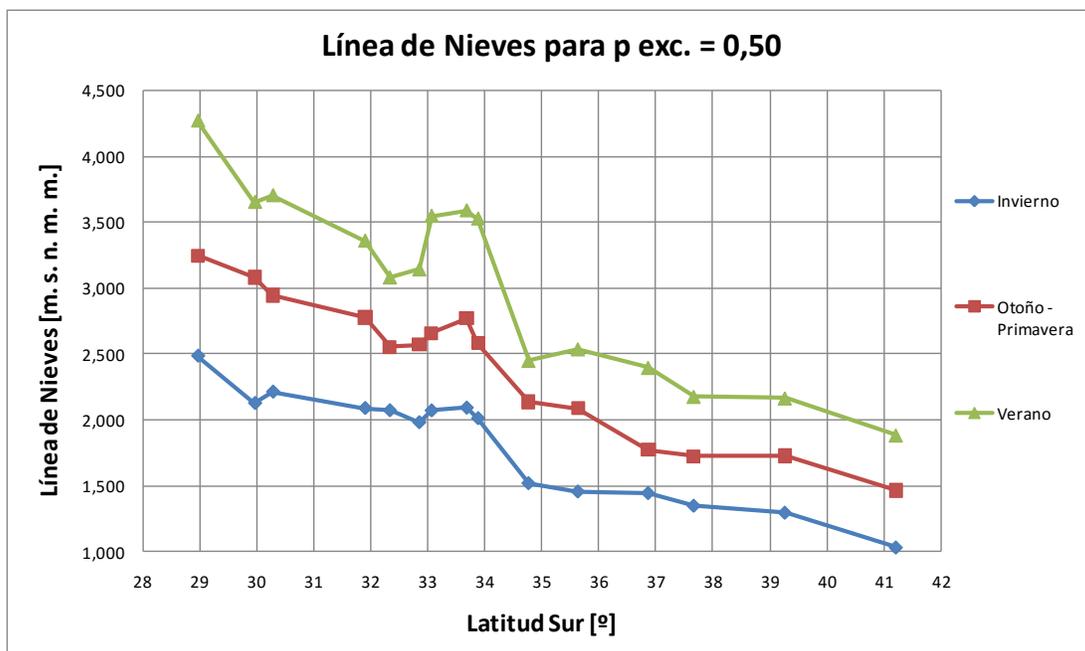
- T: Temperatura índice en [°K].
- g: Aceleración de Gravedad; 9,81 [m/s<sup>2</sup>]
- C<sub>p</sub>: Calor específico a presión constante del aire seco; 0,24 [cal/gr]
- L: Calor latente de condensación.
- R<sub>d</sub>: Constante del aire seco; 286,9 [J/kg/°K].
- ω<sub>s</sub>: Razón de mezcla de saturación del aire.
- ε: Razón entre el peso molecular del vapor de agua y el del aire seco; 0,622

Cabe señalar, que la fórmula (2) no considera el efecto de la inversión térmica, ya que se asume que durante los eventos de tormenta, la atmósfera se comporta de una manera pseudo adiabática húmeda, por lo cual la temperatura decrece en función de la altitud. La integración de la ecuación (2) se efectuó mediante el método de Euler – Cauchy, presentado por Zill (2009), adoptando una presión atmosférica a nivel medio del mar de  $p_0 = 1013$  [HPa].

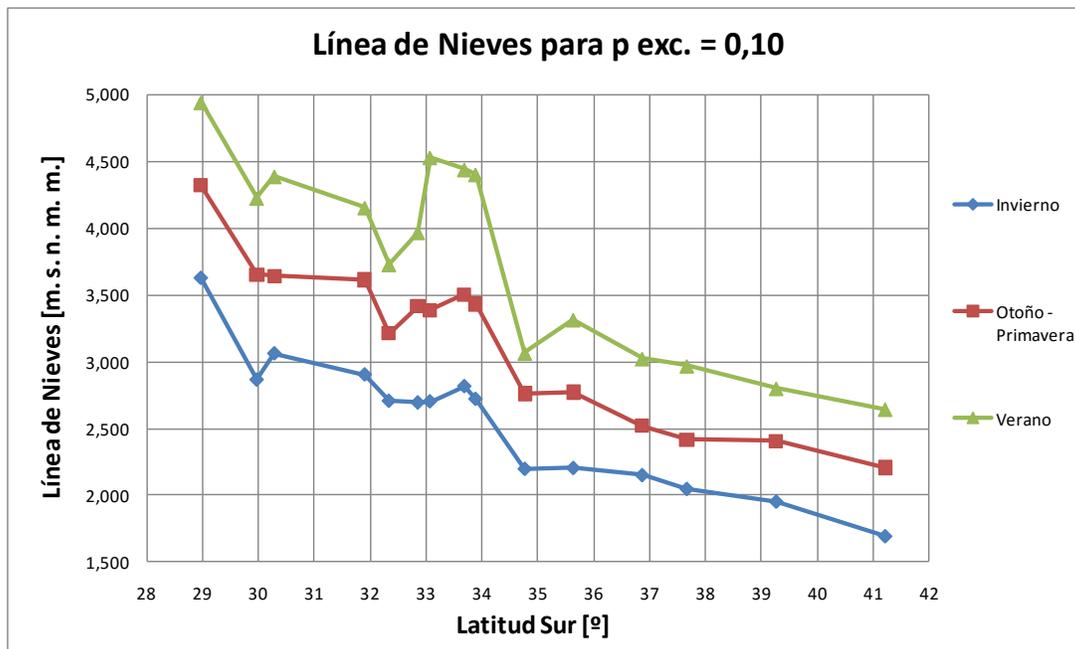
*Línea de Nieves para la época de invierno y otoño-primavera*

A partir de las curvas obtenidas entre temperaturas índices versus probabilidad de excedencia y el gradiente de temperaturas antes descrito, se procedió para cada estación a calcular la cota de la línea de nieves para probabilidades de excedencia comprendidas entre 0,90 a 0,001 y entre latitudes entre 28,5° a 41,5° de latitud sur, de acuerdo a lo efectuado en el trabajo de Covián (2012).

En los siguientes gráficos, se presentan a modo de ejemplo, los resultados para probabilidades de excedencia de 0,5 y 0,1, representando cada estación por su latitud geográfica, Los resultados para otras probabilidades se pueden obtener en el estudio de Covián (2012), los que presentan la misma tendencia que la indicada en las figuras:



**Gráfico 5:** Línea de Nieves para p exc = 0,50.



**Gráfico 6:** Línea de Nieves para  $p \text{ exc} = 0,10$ .

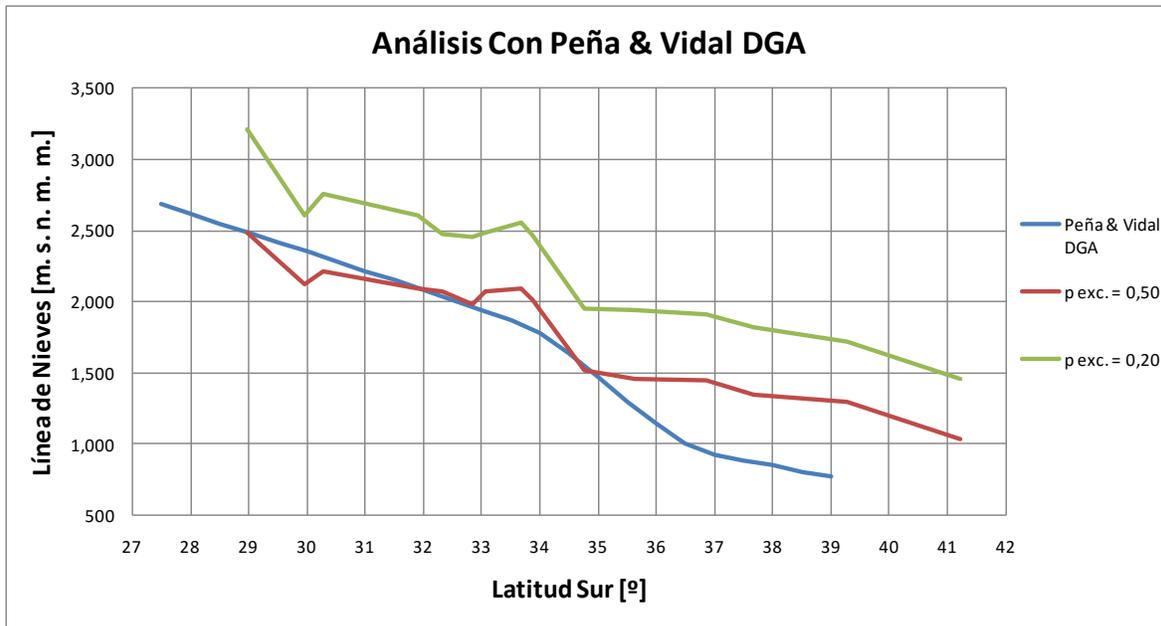
Se aprecia que la línea de nieves presenta una tendencia a disminuir a medida que aumenta la latitud, estando en concordancia con lo esperado, ya que las temperaturas disminuyen en dirección Norte-Sur.

Las curvas obtenidas para las épocas de invierno y otoño – primavera pueden ajustarse satisfactoriamente a regresiones analíticas, obteniéndose coeficientes de Pearson  $r^2 > 0,85$ . En cambio en las curvas obtenidas para la época de verano el ajuste a una distribución conocida no se cumple satisfactoriamente, debido a que se presenta una clara anomalía en cuanto al valor de la línea de nieves en las estaciones de Lagunitas, Embalse el Yeso y Las Melosas, en comparación con las estaciones de Invierno y Otoño-Primavera. Esto será tratado con mayor detalle en un acápite posterior.

### Comparación con el Trabajo de Peña & Vidal.

En un estudio de Peña & Vidal (1993) se estimó estadísticamente (es decir, se obtuvo la temperatura índice promedio de las estaciones) la línea de nieves entre los 28 a 38 grados de latitud sur durante la época de invierno, utilizando 16 estaciones hidrometeorológicas de la zona centro de Chile, para lo cual utilizó un gradiente térmico constante de  $5,0 \text{ [}^\circ\text{C/km]}$ , una temperatura umbral de línea de nieves de  $1,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$  y estableció como temperaturas índices las temperaturas mínimas registradas por estación, en contraposición a lo utilizado por Seguel & Stowhas (1985).

Se procedió a comparar los resultados obtenidos en este estudio con el trabajo realizado por Peña & Vidal (1985), los que se incluyen en el Manual de Crecidas de la DGA (1995). Para efectuar una comparación válida, ya que Peña & Vidal solo utilizaron como medida de control el promedio de las temperaturas índices de cada estación, se comparó dicho trabajo con la línea de nieves obtenida en el presente estudio para probabilidades de excedencia de 0,50 y 0,20 de la temporada de invierno, obteniéndose los siguientes resultados:



*Gráfico 7: Comparación con trabajo de Peña & Vidal.*

En este análisis comparativo se aprecia que existe una concordancia entre la curva correspondiente al trabajo de Peña & Vidal plasmada en el Manual de la DGA (1995), con respecto a la curva de este estudio para una probabilidad de excedencia de 0,50; quedando la curva para una probabilidad de excedencia de 0,20 como una envolvente superior, en las estaciones del sector centro-norte.

En las estaciones al Sur de Convento Viejo se puede apreciar que la curva correspondiente para una probabilidad de excedencia de 0,50 es una envolvente superior a la curva del trabajo de Peña & Vidal, lo cual se debe principalmente a la diferencia entre las temperaturas índices utilizadas en este estudio y las temperaturas mínimas utilizadas en el estudio de Peña & Vidal.

### **Análisis de la Línea de Nieve para la Época de Verano.**

Se apreció de resultados anteriores que para las épocas de invierno y otoño-primavera existe una buena correlación entre cota de la línea de nieves y latitud, fenómeno que no ocurre con gran claridad para la época de verano.

En efecto, la línea de nieves obtenida para la época de verano se escapa por exceso de la tendencia general en las estaciones de Lagunitas, Embalse el Yeso y Las Melosas; mientras que en menor medida se escapa de la tendencia por defecto en la estación de Convento Viejo.

En el estudio de Covián (2012), se efectuaron varias hipótesis para explicar este fenómeno, las cuales incluyeron el uso de un gradiente térmico constante único durante el verano, un gradiente térmico constante pero variable en función de la latitud y un gradiente térmico bivariable, es decir, suponiendo que el gradiente térmico en verano es función de la latitud y de la altitud. Sólo en el último caso se lograron resultados positivos, no obstante la complejidad de dicha hipótesis hizo que se descartase para propósitos prácticos.

Finalmente se determinó que la explicación de dicha anomalía consiste en diferenciar el mecanismo de precipitación que ocurre en la línea de nieves durante la época de verano, distinguiendo entre eventos de precipitación de origen ciclónico frontal y eventos de precipitación convectiva de carácter local que se presentan sólo en altura.

#### *Tipos de precipitación en la época de verano*

De acuerdo a los estudios de Garreaud & Rutland (1997), el dominio del anticiclón Pacífico SE hace que durante los meses de verano las precipitaciones de verano en el Chile Central se restrinjan exclusivamente a los sectores andinos, donde representan el 5% del valor acumulado anual. Sin embargo su carácter convectivo produce riesgos de aluviones, desprendimientos de rocas, crecidas estivales y tormentas eléctricas que afectan actividades de tipo económicas en donde la mayor precipitación anual ocurre en forma de nieve.

Por otra parte, debido a la menor influencia del anticiclón Pacífico SE, en la época de verano en los lugares de mayor latitud, se mantiene una mayor cantidad de eventos de tormentas de carácter ciclónico con precipitaciones mayores a 10 [mm] con una mayor frecuencia de tormentas de mayor duración e intensidad, generándose las condiciones propicias para la existencia de una atmósfera pseudo adiabática húmeda. Esta característica no se repite en la época de verano a menores latitudes, porque al ser menores los eventos de tormenta en cuanto a cantidad, duración e intensidad y distintos en cuanto a su génesis, no logran generar las condiciones de una atmósfera pseudo adiabática húmeda desde cotas más bajas, pudiendo corresponder ésta solo a una atmósfera “normal” e inclusive a una atmósfera adiabática seca.

De acuerdo a las hipótesis anteriores, se procedió a comparar la estadística de precipitación de las estaciones cordilleranas (Lagunitas, Embalse el Yeso y Las Melosas) con las estaciones cercanas, pero ubicadas a menor altura. Esta situación se aplica en el caso de la estación Lagunitas, con la estación Vilcuya, a 32 [km] de distancia; así como el caso de las estaciones Embalse el Yeso y Las Melosas con respecto a la estación de Pirque.

Se planteó la hipótesis que dada las cercanías entre estaciones en altura y estaciones más bajas, las precipitaciones de tipo ciclónico y/u orográfico que pueden ocurrir en altura, también deberían ocurrir en las estaciones más bajas, no así en el caso de precipitaciones convectivas.

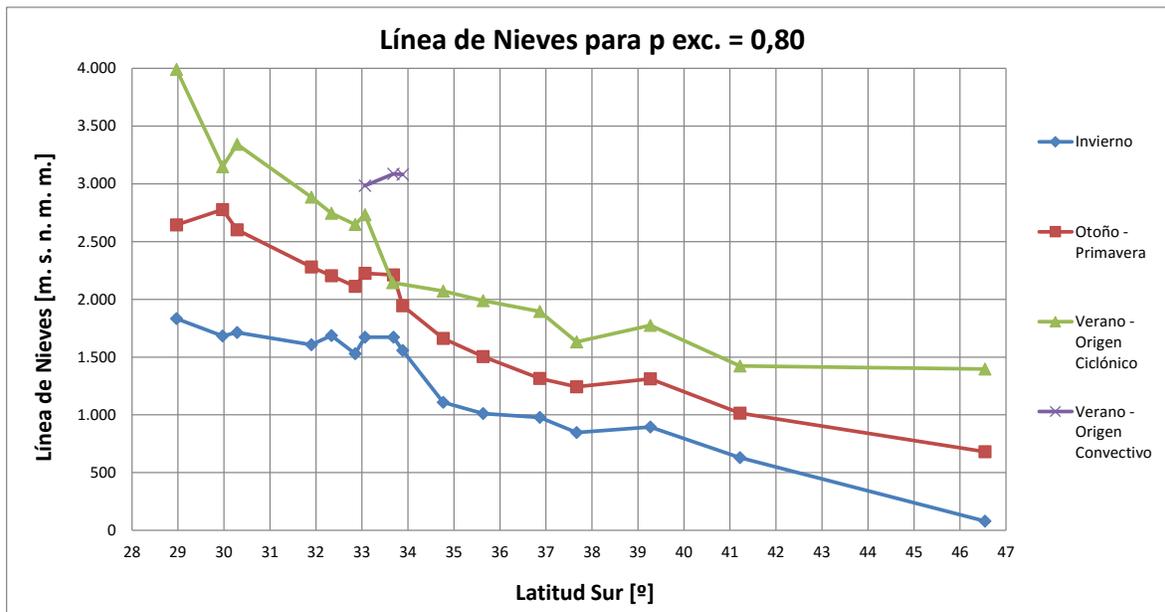
Por ello se seleccionó de la estadística de precipitación, los días correspondientes a la época de verano en las estaciones altas que también tuviesen eventos de precipitación en la época de verano en las estaciones bajas, descartando del análisis los eventos en que esto no ocurría, considerándolos como eventos convectivos locales en altura.

El procedimiento resultó aplicable para la estación Lagunitas pero no para Embalse El Yeso y las Melosas, porque el número de eventos se reducía a valores inaceptables. Ante esta situación se procedió a eliminar en el análisis de verano dichas estaciones, reemplazándolas por la estación Pirque.

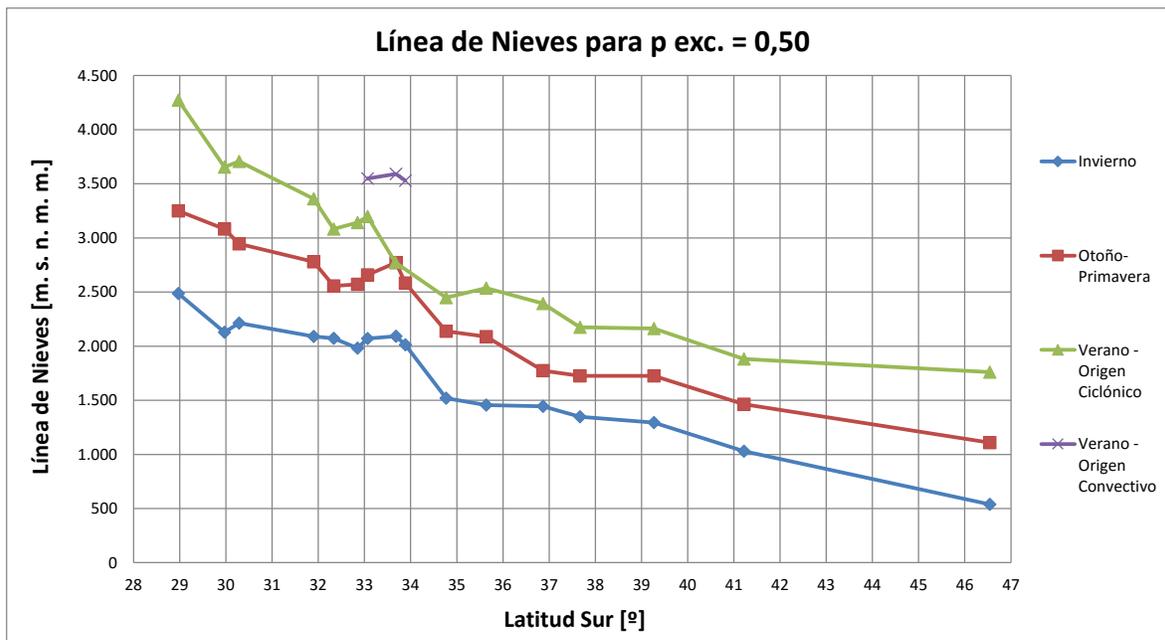
De acuerdo a lo analizado anteriormente, se procedió a modelar la línea de nieve para las épocas de invierno, otoño-primavera y verano para las probabilidades de excedencia entre 0,90 a 0,001; pero eliminando del análisis los eventos catalogados como de origen convectivo.

En los siguientes gráficos se presentan a manera de ejemplo la línea de nieves para las probabilidades de excedencia de 0,80; 0,50; y 0,10; incluyendo como referencia los eventos en Lagunitas, El Yeso y Las Melosas que incluyen precipitaciones convectivas durante la

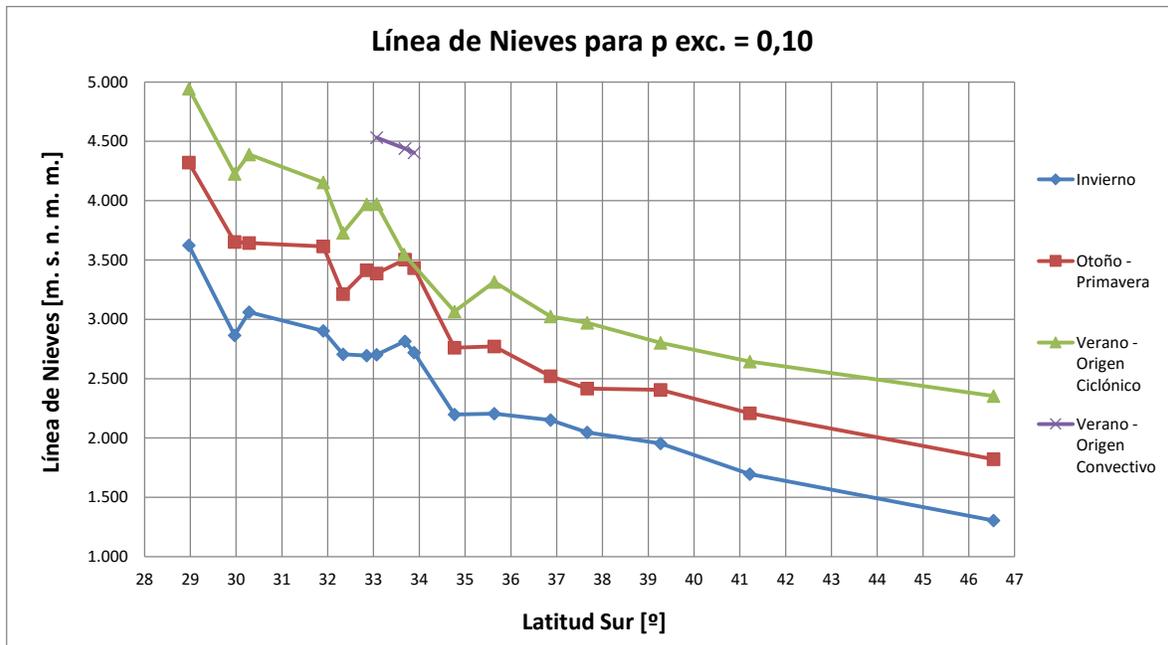
época de verano. Para ver los resultados para todas las probabilidades de excedencia, se pueden obtener en el trabajo realizado por Covián (2012), presentándose curvas similares.



*Gráfico 8: Línea de Nieves Corregida para p exc = 0,80.*



*Gráfico 9: Línea de Nieves corregida para p exc = 0,50.*



**Gráfico 2:** Línea de Nieves corregida para  $p \text{ exc} = 0,10$ .

Se aprecia al observar los gráficos N°8 al N°10, que las hipótesis realizadas para la línea de nieves en verano son adecuadas, y que la anomalía en gran medida desaparece, con la restricción de que los resultados son válidos solo para eventos de tormenta de tipo ciclónico y orográfico en la época de verano.

Se incluyen en los gráficos, a manera de referencia, los valores correspondientes a la inclusión de eventos convectivos

De acuerdo a esto se infiere que para las cuencas de tipo mixtas las precipitaciones de naturaleza convectiva no necesariamente cubrirán la superficie total de la cuenca, sino sólo la sección cordillerana más alta de ellas afectando por ende en menor medida la escorrentía que se generaría en esa zona. Este punto junto a una modelación más detallada de la línea de nieves para la época de verano bajo mecanismos de precipitación convectiva deberá ser investigado a futuro con mayor y mejor información hidrometeorológica de estaciones ubicadas directamente en zonas cordilleranas.

#### 4.- ANÁLISIS DE REGRESIÓN PARA LA MODELACIÓN DE LA LÍNEA DE NIEVES

De acuerdo al estudio base del presente trabajo (Covián, 2012), la curva de la línea de nieves en función de la latitud fue parametrizada para las 25 probabilidades de excedencia comprendidas entre 0,90 a 0,001; y las tres épocas del año descritas previamente, obteniéndose un total de 75 ecuaciones, lo que resulta de mayor precisión pero poco práctico, por lo que se intentó reducir este número considerando la probabilidad de excedencia como otra variable en el modelo y no un criterio de selección. Además, se verificó que las curvas obtenidas tuviesen una adecuada correlación, para lo cual se corroboró que los coeficientes de Pearson fuesen superiores a  $r^2 > 0,85$ .

Con ello se logró representar adecuadamente el fenómeno, reduciendo las ecuaciones a solo 6, que se presentan en los siguientes acápite.

Para cada una de las 6 ecuaciones, el significado de cada variable involucrada es el siguiente:

- ELN                      Altitud de la línea de nieves, [m]
- LAT                     Latitud geográfica de la cuenca, [°]
- $p_{exc}$                  Probabilidad de excedencia.

*Época de Invierno (meses desde Mayo hasta Septiembre)*

- $0,80 \geq p_{exc} > 0,50$

$$ELN = (646,5 * p_{exc} - 4361,1) * \ln(LAT) - 3792,3 * p_{exc} + 17951,0 \quad (3)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (3) es de  $\pm 135,5$  [m]

- $0,50 \geq p_{exc} \geq 0,001$

$$ELN = e^{\left(16,596 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)^{-0,123}\right)} * LAT^{-\left(2,577 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)^{-0,504}\right)} \quad (4)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (4) es de  $\pm 357,0$  [m]

*Época de Otoño-Primavera (Abril, Octubre y Noviembre)*

- $0,80 \geq p_{exc} > 0,05$

$$ELN = e^{15,64 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)^{-0,104}} * LAT^{\left(0,5374 * \ln\left(\ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) - 2,230\right)} \quad (5)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (5) es de  $\pm 204,9$  [m]

- $0,05 \geq p_{exc} \geq 0,001$

$$\begin{aligned} ELN = & \left(0,526 - 0,173 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) * LAT^3 + \left(20,798 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right) - 56,863\right) * LAT^2 \\ & + \left(1885,6 - 823,2 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) * LAT \\ & + \left(10916 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right) - 16228\right) \end{aligned} \quad (6)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (6) es de  $\pm 222,4$  [m]

*Época de Verano (meses desde Diciembre hasta Marzo).*

- $0,80 \geq p_{exc} > 0,25$

$$\begin{aligned} ELN = & \left(0,167 * \ln\left(\ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) - 0,247\right) * LAT^3 + \left(-20,71 * \ln\left(\ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) + 36,737\right) \\ & * LAT^2 + \left(836,9 * \ln\left(\ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) - 1835,0\right) * LAT \\ & + \left(-10630 * \ln\left(\ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)\right) + 32613\right) \end{aligned} \quad (7)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (7) es de  $\pm 138,8$  [m]

- $0,25 \geq p_{exc} \geq 0,001$

$$\begin{aligned} ELN = & -0,115 * LAT^3 * e^{0,363 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)} + 18,295 * LAT^2 * e^{0,321 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)} - 988,5 * LAT \\ & * e^{0,278 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)} + 19734,99 * e^{0,228 * \ln\left(\frac{1}{p_{exc}}\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

El error estándar de estimación de la fórmula (8) es de  $\pm 206,4$  [m]

Todas las curvas correspondientes poseen coeficientes de Pearson superiores a  $r^2 > 0,90$ .

## **5.- CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se realizó una modelación probabilística de la línea de nieves en la zona centro sur de Chile, específicamente entre los 28,5° a 46,5° de latitud sur, considerando además las tres épocas del año hidrológico.

Los resultados obtenidos en los gráficos N°5 y N°6 indican que para las épocas de invierno y otoño-primavera, la línea de nieves depende prácticamente de la latitud sur, disminuyendo de acuerdo a una tendencia esperada (es decir, con una regresión conocida cuyo coeficiente de Pearson sea  $r^2 > 0,85$ ), por lo cual hace cumplir cabalmente la hipótesis de la existencia de una atmósfera cercana a la pseudo adiabática húmeda durante eventos de tormenta.

En cambio, para la época de verano los resultados obtenidos en los gráficos N°5 y N°6 muestran que la tendencia de la línea de nieves durante eventos de tormenta muestra una anomalía en las estaciones cordilleranas ubicadas a menor latitud y mayor altitud, lo que se atribuye a la existencia de eventos de origen convectivo.

En efecto, la hipótesis señala que las precipitaciones de origen ciclónico durante la época de verano se caracterizan por tener una mayor duración, generándose las condiciones para la formación de una atmósfera pseudo adiabática húmeda. Caso contrario ocurre con las precipitaciones de origen convectivo, siendo fenómenos locales de corta duración, por lo cual no se generan las condiciones para la formación de una atmósfera pseudo adiabática húmeda en zonas más bajas.

Finalmente, la modelación propuesta de la línea de nieves sirve como base para el diseño de obras hidráulicas en zonas cordilleranas con cuencas de tipo mixto, ya que la línea de nieves determina el área pluvial de la cuenca, y por ende se estima en caudal de escorrentía para una zona determinada.

## REFERENCIAS

- Covián, Fernando., (2012), “Variabilidad de la línea de nieves durante eventos de tormenta utilizando modelación probabilística” Memoria para la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- DGA, (1995) “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” República de Chile, Ministerio de Obras Públicas, DGA.
- Garreaud, R. y J. Rutland. (1997) “Precipitación estival en Los Andes Chile Central: Aspectos climatológicos”, Departamento de Geofísica. Universidad de Chile.
- M. Lagos, E. Cornwell y J. McPhee (2013) “Metodología para estimar la Línea de Nieves en Tiempo Real y su validación con imágenes MODIS”, Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, Vol. 125, N°3, 2013.
- Peña, H. & F. Vidal (1993) “Estimación estadística de la línea de nieves durante los eventos de precipitación entre latitudes 28 y 38 grados sur.” XI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID, 1993.
- Seguel R. & L. Stowhas, (1985). “Estimación de crecidas de diseño en cuencas mixtas pluvio nivales”. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, SOCHID.
- Zill, Dennis, (2009). “Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado”, novena edición, International Thomson Editores.