

17010101
66604

1
P426e
2013



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil



ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE NIEVE EN LA ZONA ALTIPLÁNICA DE LA I Y II REGIÓN DE CHILE

Por

Alejandro Andrés Peralta Rodríguez

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y
Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Pedro Kamann Chacana
Diciembre, 2013

R.16057

- Ciencias
- Modulo en Ingeniería
- ESCUELA SUPERIOR

Agradecimientos

Esta Memoria esta dedicada a todas aquellas personas que han estado presente durante este largo proceso, fundamentalmente mis padres, quienes siempre creyeron en mi y mis capacidades dándome todo el apoyo y amor incondicional durante toda mi vida. A mis hermanos quienes siempre fueron un modelo a seguir desde que estaba en el colegio, mis compañeros de universidad con quienes formamos lazos de amistad durante este largo camino, Diego Salgado, Leandro Ramírez, Mariela Vicencio, Larry Laing, Nathan Olivares, Fredy Ríos, Carolina Jadue, Laura Salsilli y muchos más que quedan por nombrar.

Se agradece el apoyo fundamental del Profesor Pedro Kamann, quien me dio la oportunidad de trabajar en esta memoria junto a él, por su buena onda, sus consejos académicos y profesionales, tanto en clases como en el desarrollo de este trabajo.

Se agradece a los amigos con quien comparto durante mi tiempo libre, los amigos de la playa que siempre creyeron en mi, Harry, Rudy, Erik y muchos más.

Finalmente, se agradece por el conocimiento que me han entregado todos los profesores, desde el colegio hasta hoy en la universidad, quienes han sido un factor fundamental en mi crecimiento y desarrollo, tanto como persona y profesional.

RESUMEN

Cuando se quiere diseñar una obra de Ingeniería se deben tomar en cuenta diversos factores que inciden en el cálculo y diseño de ésta. Un factor importante dentro de este grupo es la escorrentía directa, la cual está asociada al área de una cuenca, la precipitación y a un coeficiente de escorrentía, el cual varía según el tipo de superficie. Estos tres elementos dependen del lugar donde se quiere proyectar cualquier obra civil.

La escorrentía superficial corresponde al flujo de agua que escurre sobre la superficie terrestre en escenarios de crecidas de caudales y por efectos de deshielo. Estas crecidas se generan a través de precipitaciones, pero no todas las precipitaciones caen de forma líquida, sino que también de forma sólida. Pero para la obtención de la escorrentía directa de un lugar, se debe tomar en cuenta la precipitación líquida, la que sólo ocurre en el área pluvial de cualquier cuenca en estudio.

El lugar donde se genera esta transición entre precipitación líquida y sólida es conocida como la Línea de Nieves, y ésta se ubica a una cota determinada variando de forma gradual según la latitud en que se encuentre.

Nuestro país abarca alrededor de 4.300 km de largo, extendiéndose desde latitudes bajas donde el clima presenta condiciones secas, y otras latitudes donde el clima se puede presentar de forma templada y húmeda. Según estudios realizados anteriormente, esta línea de nieves fue estimada entre las latitudes 28° y 41° sur, las que abarcan la zona centro sur del país, dejando a un lado la estimación para la parte norte de Chile. Es por eso que en este estudio se estimó la línea de nieve para latitudes bajas, abarcando la I y II región de Chile.

El estudio realizado en este trabajo se materializó seleccionando un total de 5 estaciones hidro – meteorológicas, las que se encuentran a lo largo de la I y II región próximas a la Cordillera de los Andes, a las que se le realizó un análisis de bondad de ajuste de las temperaturas representativas del aire durante los eventos de precipitaciones mayores o igual a [10 mm], acotando el estudio a la época de verano por la casi nula precipitación en épocas de invierno – otoño y primavera, obteniendo así para verano las temperaturas índices en función de la probabilidad de excedencia.

Con la ayuda de fotos satelitales, se estimó la temperatura índice para días de tormenta, la cual se obtuvo mediante una relación entre la cota real de nieves entregada por las imágenes para días de precipitación, los datos de temperatura y el gradiente térmico para dichos días.

Con esta temperatura índice, según su probabilidad de excedencia, se determinó la línea de nieves en condiciones de tormenta para distintos periodos de retorno.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

GLOSARIO.....	9
1 CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES	11
1.1 Introducción	11
1.2 Planteamiento del Problema	12
1.2.1.1 Objetivos.....	13
1.3.1 General	13
1.3.2 Específicos	13
1.4 Alcances de la Investigación	14
2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	15
2.1 Generalidades.....	15
2.2 Precipitación	15
2.3 Cuenca Hidrográfica	17
2.4 Escorrentía Superficial.....	18
2.4.1 Caudal de Escorrentía.....	18
2.5 Temperatura del Aire como Índice del Área Pluvial.	20
3 CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA ÍNDICE	23
3.1 Clima en la zona Altiplánica.	23
3.2 Temperatura índice en la zona norte.....	24
3.3 Estaciones hidro - meteorológicas seleccionadas.	25
3.3.1 Estación Coyacagua.....	25
3.3.2 Estación Ollagüe	26
3.3.3 Estación Linzor	27
3.3.4 Estación El Tatio.....	28
3.3.5 Estación Peine.....	29
3.4 Estimación de Temperatura índice.....	30
4 CAPÍTULO IV : ANÁLISIS DE BONDAD DE AJUSTE.....	35
4.1 Recopilación de datos	35
4.3 Análisis de bondad de ajuste.....	40
4.4 Resultados del Análisis de Bondad de Ajuste.....	43
5 CAPÍTULO V: MODELACIÓN DE LA LINEA DE NIEVE.	47
5.1 Gradiente de temperatura para condiciones de tormenta.	47
5.2 Línea de Nieves con gradiente Pseudo Adiabático húmedo	49
5.3 Modelación de la Línea de nieve para la I y II región de Chile.	50

5.4	Análisis de la Línea de nieves	51
5.5	Comparación con las Imágenes Satelitales	52
5.6	Línea de nieves según Imágenes Satelitales.....	53
5.7	Modelación matemática de la Línea de Nieve en Verano.....	56
6	CAPÍTULO VI: APLICACIONES EN CUENCAS MIXTAS	57
6.1	Análisis de Regresión	57
6.2	Determinación del Área pluvial y Área nival.....	59
	CONCLUSIONES.....	60
	REFERENCIAS.....	62
	Anexos.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1- Formación de precipitación en las nubes. Fuente: Hidráulica Aplicada 1994.</i>	16
<i>Figura 2.2- Pluviómetro. Fuente: Apuntes de Hidrología, Pedro Kamann.</i>	16
<i>Figura 2.3- Cuenca Hidrográfica. Fuente: ArcGIS.</i>	17
<i>Figura 2.4- Cuenca de tipo mixta. Fuente: Elaboración propia.</i>	19
<i>Figura 2.5- Temperaturas mínimas en estación Lagunitas. Fuente: Seguel & Stöwhas.</i>	21
<i>Figura 2.6- Temperaturas máximas en estación Lagunitas. Fuente: Seguel & Stöwhas.</i>	21
<i>Figura 3.1- Radiación Infrarroja emergente (a)Junio-Agosto (b)Diciembre-Febrero. Fuente: Aceituno & Montecinos.</i>	23
<i>Figura 3.2- Ubicación Estación Coyacagua.</i>	25
<i>Figura 3.3- Ubicación Estación Ollagüe.</i>	26
<i>Figura 3.4- Ubicación Estación Linzor.</i>	27
<i>Figura 3.5- Ubicación Estación El Tatío.</i>	28
<i>Figura 3.6- Ubicación Estación Peine.</i>	29
<i>Figura 3.7- Índice de Nieve, Latitud 19°36'S – 20°12'S.</i>	30
<i>Figura 3.8- Índice de Nieve, Latitud 21°00'S – 22°00'S.</i>	31
<i>Figura 3.9- Índice de Nieve, Latitud 22°12'S – 23°12'S.</i>	31
<i>Figura 3.10- Índice de Nieve, Latitud 23°24'S – 24°24'S.</i>	32
<i>Figura 3.11- Índice de Nieve, Latitud 24°00'S – 25°00'S.</i>	32
<i>Figura 4.1- Temperaturas extremas Estación Coyacagua. Fuente: Elaboración Propia.</i>	37
<i>Figura 4.2- Temperaturas extremas Estación Ollagüe. Fuente: Elaboración Propia.</i>	38
<i>Figura 4.3- Temperaturas extremas Estación Linzor. Fuente: Elaboración Propia.</i>	38
<i>Figura 4.4- Temperaturas extremas Estación El Tatío. Fuente: Elaboración Propia.</i>	39
<i>Figura 4.5- Temperaturas extremas Estación Peine. Fuente: Elaboración Propia.</i>	39
<i>Figura 4.6- Temperaturas índices versus p excedencia para Coyacagua. Fuente: Elaboración propia.</i>	44
<i>Figura 4.7- Temperaturas índices versus p excedencia para Ollagüe. Fuente: Elaboración propia.</i>	44
<i>Figura 4.8- Temperaturas índices versus p excedencia para Linzor. Fuente: Elaboración propia.</i>	45
<i>Figura 4.9- Temperaturas índices versus p excedencia para El Tatío. Fuente: Elaboración propia.</i>	45
<i>Figura 4.10- Temperaturas índices versus p excedencia para Peine. Fuente: Elaboración propia.</i>	46

<i>Figura 5.1- Línea de Nieve para gradiente Pseudo Adiabático Húmedo. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2- Línea de Nieves para $P_{exc} = 0.90$ a $P_{exc} = 0.01$. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.3- Índice de Nieves en día de tormenta, I y II Región de Chile.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.4- Línea de Nieves para Tormenta 1 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.5- Línea de Nieves para Tormenta 2 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.6- Línea de Nieves para Tormenta 3 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.</i>	<i>55</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Temperaturas Índices y Factor k. Fuente: Elaboración propia.</i>	33
<i>Tabla 2: Estaciones hidro – meteorológicas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.</i>	35
<i>Tabla 3: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de invierno. Fuente: Elaboración propia.</i>	36
<i>Tabla 4: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de Otoño - Primavera. Fuente: Elaboración propia.</i>	36
<i>Tabla 5: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de Verano. Fuente: Elaboración propia.</i>	36
<i>Tabla 6: Coeficiente de correlaciones entre temperaturas y precipitaciones. Fuente: Elaboración propia.</i>	40
<i>Tabla 7: Bondad de Ajuste para Coyacagua. Fuente: Elaboración Propia.</i>	41
<i>Tabla 8: Bondad de Ajuste para Ollagüe. Fuente: Elaboración Propia.</i>	41
<i>Tabla 9: Bondad de Ajuste para Linzor. Fuente: Elaboración Propia.</i>	42
<i>Tabla 10: Bondad de Ajuste para El Tatio. Fuente: Elaboración Propia.</i>	42
<i>Tabla 11: Bondad de Ajuste para Peine. Fuente: Elaboración Propia.</i>	42
<i>Tabla 12: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 1</i>	53
<i>Tabla 13: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 2</i>	53
<i>Tabla 14: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 3</i>	54
<i>Tabla 15: Modelación matemática de la línea de nieves en verano. Fuente: Elaboración propia.</i>	56
<i>Tabla 16: Línea de nieve de diseño para verano. Fuente: Elaboración Propia.</i>	58



GLOSARIO

- **Cuenca Mixta:** Cuenca donde los aportes de precipitación son del tipo líquido y sólido, por lo que estas cuencas se caracterizan por contar con un área pluvial y un área nival.
- **Área Pluvial:** Corresponde al área de la cuenca en la que sólo cae precipitación del tipo líquida. Esta área se encuentra bajo la línea de nieve.
- **Área Nival:** Corresponde al área de la cuenca en la que sólo cae precipitación del tipo sólido o nieve. Esta área se encuentra sobre la línea de nieve.
- **Gradiente de Temperatura:** Tasa a la cual la temperatura desciende con respecto a la altura.
- **Línea de Nieve:** Línea divisora que separa las áreas de tipo pluvial y nival, ubicada a una cierta altura con respecto del nivel medio del mar.
- **Temperatura Índice:** Corresponde a la temperatura representativa del aire durante la precipitación.
- **Temperatura Umbral:** Corresponde a la temperatura índice a la cual se ubica la línea de nieves.
- C_p : Calor específico a presión constante del aire seco. [0,24 cal/gr.]
- ϵ : Razón entre el peso molecular del vapor de agua y el peso molecular del aire seco [0,622]
- e : Presión de Vapor de agua.
- e_s : Presión de Vapor de agua saturado.
- g : Aceleración de gravedad [9.81 m/s²]
- γ : Gradiente de temperatura para condiciones normales [6,5°C/km]
- Γ_s : Gradiente Pseudo Adiabático húmedo.

- Γ_d : Gradiente Adiabático seco
- **L**: Calor Latente de condensación
- m_v : Peso molecular del vapor de agua [18 gr/mol]
- **p**: Presión atmosférica a una cota determinada
- p_0 : Presión atmosférica a 0 [m.s.n.m.m.] [1013 HPa]
- **r**: Coeficiente de correlación
- **R**: Constante universal de los gases. [1,987 cal/mol/°K]
- R_d : Constante del aire seco [286,9 J/kg/°K]
- T_i : Temperatura índice del aire durante precipitación
- T_{max} : Temperatura máxima del aire durante precipitación
- T_{min} : Temperatura mínima del aire durante precipitación
- T_0 : Temperatura a 0 [m.s.n.m.m.]
- ω : Razón de Mezcla
- ω_s : Razón de Mezcla de saturación del aire

1 CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Introducción

Para el cálculo de escorrentía directa sobre una cuenca producto de las precipitaciones, existen varios métodos de solución, los más comunes dentro del área profesional Hidráulica son la Fórmula Racional e Hidrograma Unitario. Los cuales son muy precisos en cuencas de tipo pluvial donde las precipitaciones son del tipo líquida y las pérdidas ocurren solamente por infiltración sobre el tipo de suelo de la cuenca.

Pero cuando se trata de cuencas del tipo mixto, donde existen precipitaciones del tipo pluvial y nival, los métodos mencionados anteriormente se vuelven un tanto imprecisos, ya que la escorrentía directa no actúa sobre la totalidad de la cuenca, sino solo en una parte de esta.

Entonces, para determinar el área pluvial de una cuenca mixta que aporta a la escorrentía directa, se debe realizar un estudio de la línea de nieves, que consiste en la línea ubicada a cierta cota topográfica la cual separa la precipitación líquida de la precipitación sólida que actúa sobre una determinada cuenca.

La línea de nieves varía según la época del año, ya que esta se encuentra relacionada con las temperaturas representativas de las tormentas. Por lo tanto, obteniendo la línea de nieves para un determinado lugar y época del año, se podrá determinar el área pluvial que aporta a la escorrentía directa de la cuenca.

1.2 Planteamiento del Problema

Cuando se quiere proyectar una obra civil se debe tomar en cuenta las crecidas de caudales que ocurren en eventos de tormenta, dichas crecidas dependen de la escorrentía directa, la precipitación y un coeficiente de escorrentía. Sin embargo, las precipitaciones pueden caer de forma líquida y sólida, y para la obtención de la escorrentía directa sólo se debe tomar en cuenta el área pluvial de la cuenca en estudio, es decir, el área donde precipita de forma líquida.

La cota donde se genera la diferencia entre precipitación líquida y sólida se conoce como la línea de nieves, la cual en investigaciones realizadas con anterioridad, se ha estimado para la zona central del país dejando a un lado todo lo que es la zona norte, que a pesar de presentar un clima árido, han existido eventos de precipitación que han generado inundaciones y aluviones por efecto de las crecidas de caudales.

Por lo tanto, como la cota de línea de nieves se ha determinado sólo en la zona central del país, en este estudio se estimará para la I y II región, zona donde se concentra gran parte de la minería de Chile.

1.2.1.1 Objetivos

1.3.1 General

- Estimar la línea de nieve asociada a la localidad donde se desarrollarán obras de ingeniería en la primera y segunda región de Chile.

1.3.2 Específicos

- Determinar la temperatura índice en días de tormenta mediante imágenes satelitales y datos hidro meteorológicos de la I y II región de Chile
- Elaborar un modelo probabilístico que dependa de la época del año y al periodo de retorno que se desea diseñar, con el cual se podrá calcular el área pluvial de la cuenca a estudiar.

1.4 Alcances de la Investigación

Se realiza un análisis estadístico de los datos de temperaturas para distintas estaciones de la I y II Región obtenidas de la Dirección General de Aguas, las que se incorporan al modelo probabilístico, para así determinar las temperaturas a las cuales precipita.

Se utilizan conceptos de Meteorología e Hidrología para realizar el cálculo probabilístico de la línea de nieve.

El modelo de línea de nieve se realiza en función de la latitud, periodo de retorno y época del año.

Las fotos satelitales del área en estudio se obtienen del Satélite MODIS/Terra.

2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

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

Si bien las crecidas nivales pueden ser las más críticas en cuanto a la magnitud de los volúmenes de crecida resultantes, en cuanto a los caudales máximos instantáneos las crecidas pluviales suelen ser las que determinan los valores críticos de diseño (Seguel & Stöwhas 1985).

Las crecidas máximas podrían originarse por aluviones debido a las intensas precipitaciones de verano, lo cual es lógico debido a que las precipitaciones de verano están asociadas a temperaturas mayores respecto a las de otras estaciones del año, razón por la cual la línea de nieve asciende y genera una mayor área pluvial, en comparación a las precipitaciones de igual o mayor intensidad que ocurriesen en invierno, y en efecto, la línea de nieves tendría un descenso generando una menor área pluvial.

Por lo tanto, las crecidas de diseño están relacionadas con la intensidad de precipitación de la tormenta y el área pluvial de la cuenca, la cual es función de la línea de nieves, y en efecto, de las temperaturas de las tormentas.

2.2 Precipitación

Se conoce como precipitación a las distintas formas en que el agua cae sobre la superficie terrestre, las que incluyen la lluvia, la nieve y otros procesos tales como el hielo. Este fenómeno ocurre cuando una masa de aire al elevarse en la atmósfera se enfría y parte de su humedad se condensa de un estado de vapor a un estado líquido.

Para que la condensación tenga lugar se requiere de un aerosol o partícula llamada Núcleo de condensación, mediante la cual las moléculas del agua se pueden unir o nuclear, de lo contrario, el aire puede llegar a sobresaturarse.

Al formarse estas pequeñas gotas de agua, sus tamaños van aumentando por condensación y por el impacto que tienen con otras gotas cercanas a medida que se mueven por la turbulencia del aire, llegando a un tamaño suficiente que les permita caer a la superficie terrestre por efecto de la gravedad.



Figura 2.1- Formación de precipitación en las nubes. Fuente: Hidráulica Aplicada 1994.

Las mediciones de las precipitaciones se realizan en distintos puntos geográficos en un área determinada, tales puntos representan la medición puntual y permiten la estimación de precipitaciones medias para una zona geográfica.

Para medir dichas precipitaciones se utiliza un instrumento llamado pluviómetro y/o pluviógrafo, el cual debe estar ubicado en un lugar despejado, sin presencia de árboles o edificios que interfieran. La unidad de medición es en milímetros.

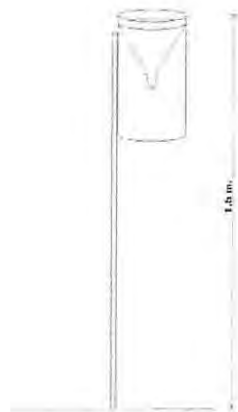


Figura 2.2- Pluviómetro. Fuente: Apuntes de Hidrología, Pedro Kamann.

2.3 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca Hidrográfica corresponde a un territorio natural que capta tanto precipitación sólida como precipitación líquida, donde las aguas fluyen a través de una multitud de esteros hasta llegar a un punto de salida, la cual está delimitada de forma natural por una divisoria topográfica que drena sus aguas a un cauce común. Es de forma cóncava, lo cual permite el escurrimiento superficial por efectos de la gravedad a distintas quebradas y ríos que la conforman.

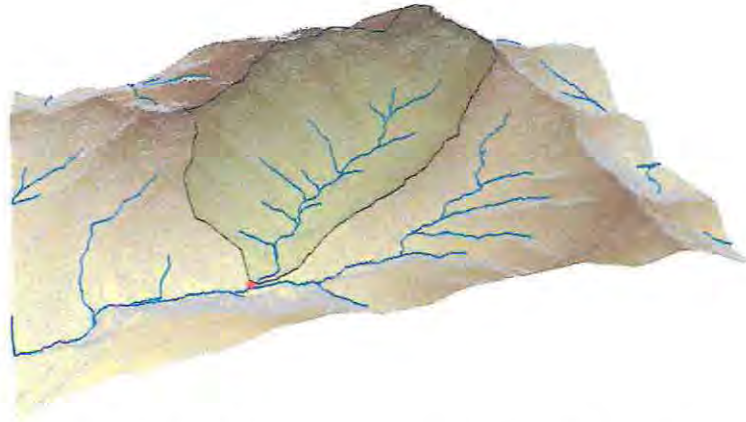


Figura 2.3- Cuenca Hidrográfica. Fuente: ArcGIS.

Una cuenca consta de diferentes parámetros geomorfológicos que tienen gran relevancia en las crecidas de diseño, y estos son los siguientes:

- Área de la cuenca: Está determinada por una línea imaginaria que delimita el área de confluencia por la divisoria topográfica, la cual contribuye con escorrentía superficial.
- Altura: Es un factor importante respecto a la temperatura y precipitación, ya que a cierta cota la precipitación es del tipo nival, lo cual no aporta a la escorrentía directa.
- Longitud del cauce principal: Distancia entre el punto de desagüe y el punto mas alejado de la cuenca en dirección del drenaje
- Pendiente del cauce principal: Es la relación entre la altura total del cauce y su longitud. Esta tiene directa relación con la escorrentía superficial.
- Desnivel máximo de la cuenca: Diferencia entre el punto de desagüe y el punto mas alejado de la cuenca en dirección del drenaje.

2.4 Escorrentía Superficial

Se denomina escorrentía superficial al agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. Está directamente relacionada al exceso de precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno.

La escorrentía superficial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca, teniendo como variable el Caudal de escorrentía y el Coeficiente de escorrentía, que depende del tipo de superficie donde escurre el agua.

2.4.1 Caudal de Escorrentía

El caudal de escorrentía directa en un instante t producto de una tormenta con hidrograma de precipitación efectiva $i(t)$, se puede calcular mediante la integral de convolución mostrada en la fórmula (1).

$$Q(t) = \int_0^t i(t) * h(t - \tau) dt \quad (1)$$

$h(t)$: Hidrograma unitario instantáneo de la cuenca

$i(t)$: Intensidad de precipitación efectiva.

Para evaluar este caudal máximo de crecida se debe evaluar la integral de la fórmula (1) hasta el tiempo en donde se produce el máximo caudal.

Existen diversos hidrogramas unitarios sintéticos que permiten evaluar el caudal máximo, entre estos se encuentran los Hidrogramas unitarios sintéticos de Benítez y Rodríguez (1974), el Hidrograma sintético de la Dirección General de Aguas, o el uso de fórmulas empíricas tales como la de Verni y King (1977) o la más común Fórmula Racional mostrada en la fórmula (2).

$$Q_{\max} = C * i(tc) * A \quad (2)$$

En el caso de las cuencas pluviales, la fórmula (2) es sólo función de $i(tc)$, intensidad de diseño calculada en el tiempo de concentración de la cuenca, siendo C el coeficiente de

escorrentía y A el área de cuenca, parámetros de entrada. Sin embargo, en cuencas de tipo mixtas la fórmula racional es función de la precipitación de diseño y del área pluvial de la cuenca que aporta a la escorrentía directa.

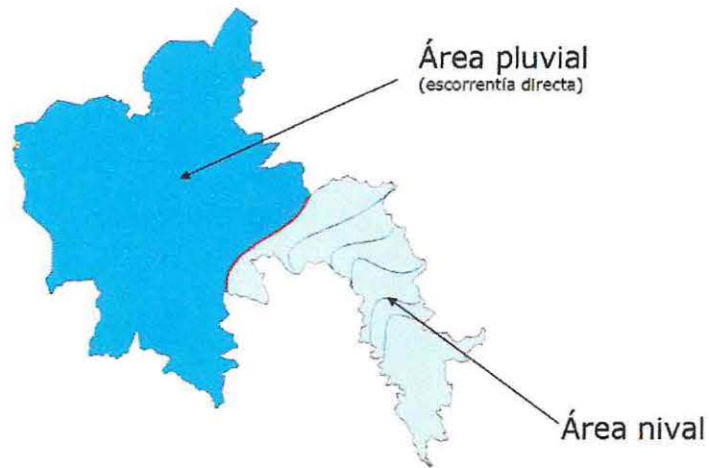


Figura 2.4- Cuenca de tipo mixta. Fuente: Elaboración propia.

A través de la fórmula (3) se puede plantear en términos probabilísticos lo mencionado anteriormente.

$$P(Q_{\max} > Q_o) = \int_{A=0}^{A=A_t} \int_{i=i^*}^{i=\infty} g(i, A) di dA \quad (3)$$

Donde:

$i^* = f(Q_o, A)$: Valor de la intensidad efectiva que arroja un valor de $Q_{\max} = Q_o$ para un determinado valor de A .

$g(i, A)$: Función de densidad de frecuencia conjunta de i y A .

2.5 Temperatura del Aire como Índice del Área Pluvial.

La línea de nieves, cota que separa la precipitación líquida de la precipitación sólida, es totalmente relevante en la determinación del área pluvial, ya que esta área dependerá fundamentalmente de la ubicación de ella. Y como la forma de precipitación es una función de la temperatura, parece ser lógico el uso de la temperatura ambiente como un buen índice de la línea de nieves.

Se consideran las temperaturas del aire, ya sean las temperaturas máximas y mínimas diarias en los días que ocurren precipitaciones significativas, tal como lo hizo Covián (2011) en su trabajo, quien consideró las precipitaciones mayores o iguales a 10 [mm]. Seguel & Stöwhas, además de Peña & Vidal, consideraron el mismo criterio.

En los trabajos de Seguel & Stöwhas y Covián, se clasificó los meses del año en tres épocas con objeto de dividir el año hidrológico en tres periodos relativamente homogéneos en cuanto a su comportamiento termo – pluviométrico, eliminando el efecto de la variación cíclica estacional.

Tomando en consideración lo anterior, en este trabajo se emplea el mismo criterio, clasificando los meses del año en 3 épocas.

- Invierno: Época que incluye los meses de Mayo a Septiembre.
- Otoño - Primavera: Época que incluye los meses de Abril, Octubre y Noviembre.
- Verano: Época que incluye los meses de Diciembre a Marzo.

En cuanto a la temperatura umbral, generalmente se usa un valor que varía entre 0 y 2°C, el cual se ha convertido en un parámetro apropiado para diversos modelos de estudio (US Army Corps of Engineers, 1956).

Singh & Singh (2001) describió un procedimiento en que para temperaturas bajo los 0°C precipitó nieve, mientras que las precipitaciones que ocurrieron sobre los 2°C fueron de forma líquida, por lo que para la temperatura umbral utilizó una interpolación lineal entre 0 y 2°C. Willen *et al.* (1971) desarrolló un procedimiento similar para estimar la proporción de lluvia y nieve en un evento de tormenta, el cual fue también utilizado en el modelo PRMS por Leavsley *et al* (1983), (Principles of snow hydrology, David R. DeWalle and Albert Rango, 2008).

Además, estudios realizados en Chile han demostrado que esta temperatura toma valores similares a los mencionados anteriormente. En el trabajo realizado por Fernando Covián (2011), quien toma en cuenta parte de la zona norte, específicamente la III Región de Chile donde las características climáticas son similares a las de la zona de este estudio, se utilizó una temperatura umbral de 0,9°C, temperatura que fue determinada por Seguel & Stöwhas, donde se grafican las

temperaturas extremas registradas en la estación de Lagunitas utilizando diferente nomenclatura para distinguir eventos con precipitación sólida, líquida o mixta.

A continuación se muestra en La Figura 2.5 y 2.6, el estudio realizado por Seguel & Stöwhas correspondiente a la estación de Lagunitas.

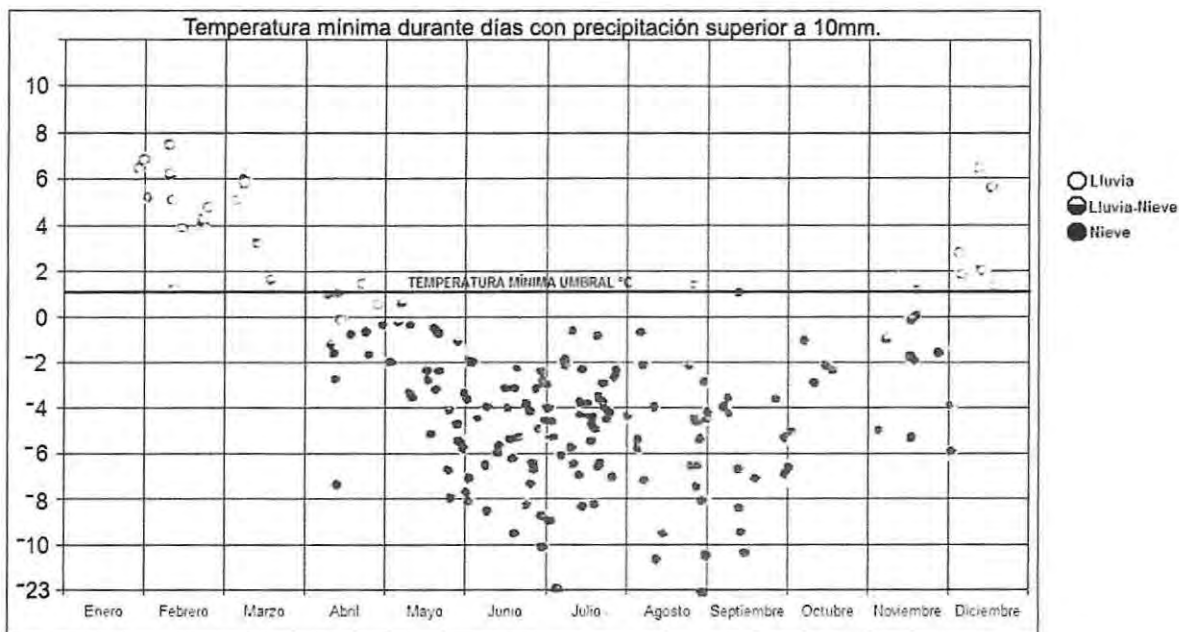


Figura 2.5- Temperaturas mínimas en estación Lagunitas. Fuente: Seguel & Stöwhas.

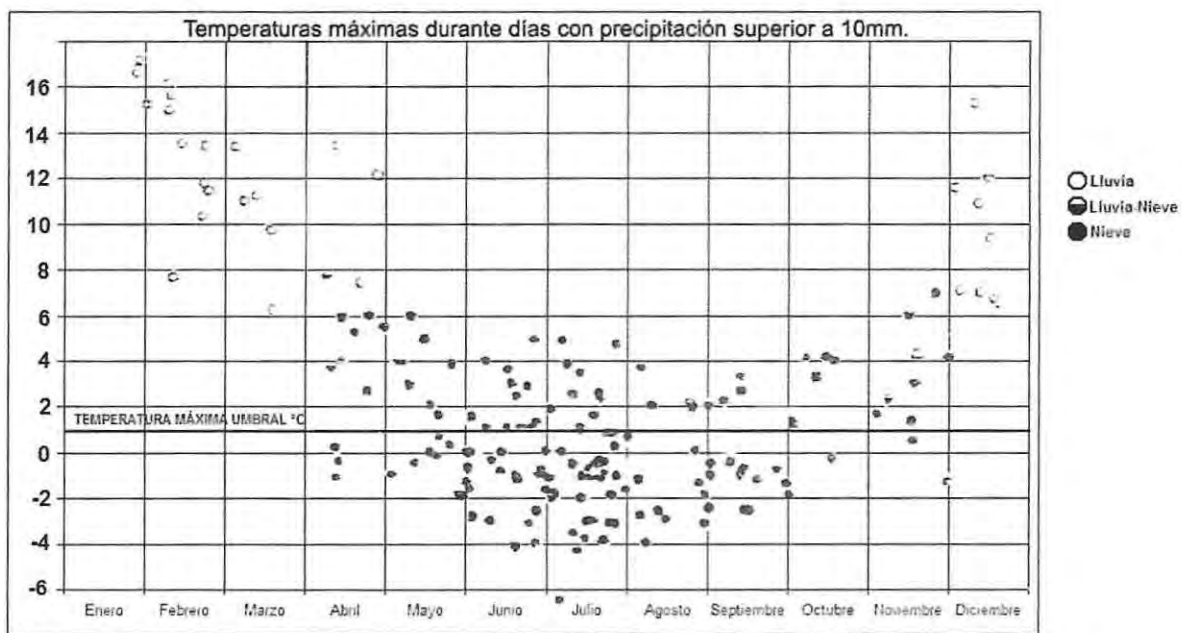


Figura 2.6- Temperaturas máximas en estación Lagunitas. Fuente: Seguel & Stöwhas.

Como se puede observar en la Figura 2.5, la mayor temperatura máxima registrada en Lagunitas con precipitación sólida es de 1,0° [C], en cambio en la Figura 2.6 la menor temperatura mínima registrada con precipitación líquida corresponde a 0,8° [C]. De acuerdo a estos valores, se puede apreciar que existe una estrecha banda entre ambos como para diferenciar la forma de precipitación. Sin embargo, por falta de antecedentes hidro-meteorológicos de la zona en estudio, la variación no significativa que existe en la temperatura umbral, tanto en Chile como a nivel mundial, y el criterio utilizado por Fernando Covián para la III Región de Chile, se permitió utilizar la investigación de Seguel & Stöwhas, adoptando el valor de 0.9° [C] como temperatura umbral para este estudio.

Por otra parte, la información base de las temperaturas que dispone una estación meteorológica son las de temperaturas diarias extremas y medias, cuyos valores no coinciden con las temperaturas existentes del aire durante el temporal, por lo que resulta práctico adoptar una temperatura índice única representativa de las temperaturas del aire durante la tormenta, la cual se basa en que normalmente no se registra precipitación en forma continua durante las 24 horas del día, sino que solo en algunas horas, y además que la precipitación ocurre generalmente durante el periodo mas frío del día.

La temperatura índice esta definida en el trabajo de Seguel & Stöwhas mediante la fórmula (4)

$$T_i = \frac{1}{k} * (T_{\max} + (k-1) * T_{\min}) \quad k \geq 2 \quad (4)$$

Donde k adopta el valor de $k = 7$, valor con que la temperatura índice se encuentra mas cercana a la temperatura del punto de rocío, lo cual reflejaría mejor las condiciones meteorológicas durante la tormenta y la hipótesis de la atmósfera saturada pseudos adiabática. Una temperatura índice más cercana a la mínima produce mejores resultados (Seguel & Stöwhas).

3 CAPÍTULO III: ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA ÍNDICE

3.1 Clima en la zona Altiplánica.

Como se demostró en los trabajos de Seguel & Stöwhas y Fernando Covián, la fórmula descrita en el Capítulo II correspondiente a la temperatura índice, es válida para la zona central del país, donde las condiciones climáticas que se presentan son totalmente diferentes a las de la zona donde se realizará este estudio.

La zona norte de Chile se caracteriza por tener un clima seco, del tipo desértico, donde las precipitaciones se presentan en forma escasa, y las temperaturas extremas tienden a alejarse, obteniéndose una oscilación térmica mayor en comparación a las de la zona central, es decir, las temperaturas máximas son mas altas y las temperaturas mínimas mas bajas.

El Altiplano sudamericano, tiene un gran impacto sobre la circulación atmosférica de la región tropical y subtropical de América del Sur durante el verano austral. Al noreste se extiende la cuenca de la amazona donde prevalecen condiciones húmedas y cálidas, mientras que la zona costera hacia el oeste, se caracteriza por presentar condiciones extremadamente áridas que se asocian en parte al permanente efecto estabilizador del anticiclón subtropical del Pacífico Sur

La precipitación en esta zona tiene un marcado carácter estacional que se relaciona directamente con el ciclo anual de la actividad convectiva sobre el continente.

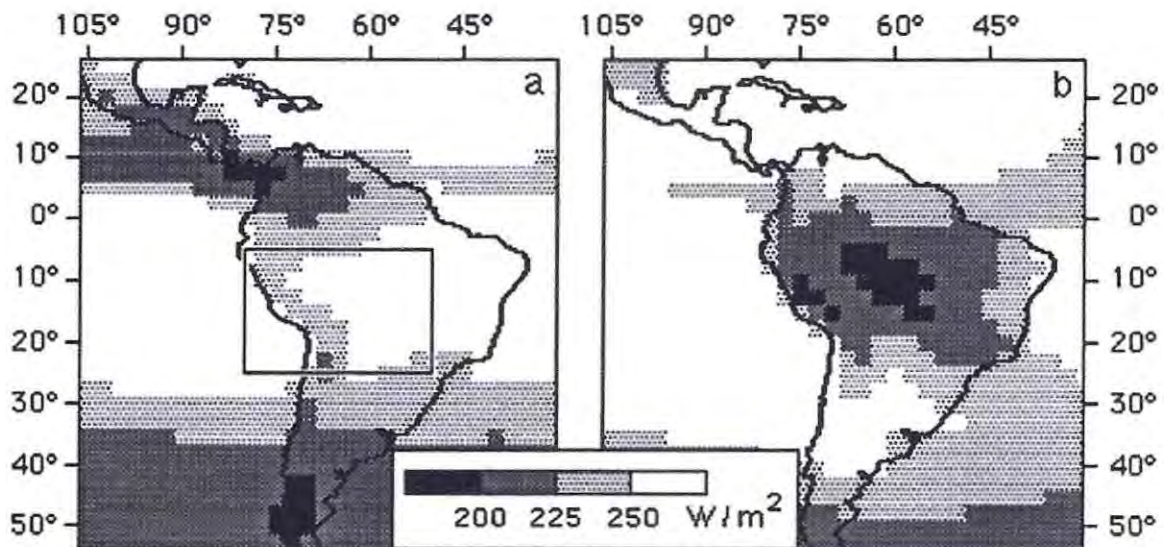


Figura 3.1- Radiación Infrarroja emergente (a)Junio-Agosto (b)Diciembre-Febrero. Fuente: Aceituno & Montecinos.

Como se puede apreciar en la Figura 3.1, en el invierno austral (a), correspondiente al periodo seco del altiplano, la actividad convectiva se concentra en el noroccidente del continente, y en el verano austral (b) la actividad convectiva se desplaza hacia el sur, extendiéndose sobre la mayor parte tropical del continente.

Los núcleos de convección en la zona altiplánica se asocian con el desarrollo de una circulación anticiclónica en los niveles altos de la tropósfera, alrededor de un centro de alta presión denominada Alta de Bolivia (Gutman y Schwerdtfeger; 1965; Virji, 1981)

3.2 Temperatura índice en la zona norte

La fórmula (4) descrita por Stöwhas entrega el resultado de la temperatura índice para una determinada condición meteorológica, donde los datos de entrada son la temperatura máxima y la temperatura mínima. Estos datos de entradas se encuentran ligados directamente a un factor k , el cual según la fórmula descrita debe ser mayor o igual a 2, es decir, la temperatura índice jamás sobrepasará la temperatura media, y mientras mayor sea este factor, menor será la temperatura índice, tomando un valor cercano al de la temperatura mínima.

Es por eso que para la zona central del país, como lo hizo Covián en su trabajo, se utilizó un factor k ($k=7$) de tal manera que la temperatura índice adopta un valor cercano a la temperatura mínima y por ende al de la temperatura umbral. Pero este criterio es válido solo para la zona central del país, ya que la naturaleza de precipitación que se da en el lugar es generalmente del tipo anticiclónica presentándose en forma de sistemas frontales con una oscilación térmica relativamente menor a la que se presenta en el norte del país. Sin embargo, la zona donde se desarrolla este estudio, presenta las condiciones climáticas descritas en el punto 3.1, lo cual podría invalidar en principio el criterio de adoptar un $k = 7$.

Por lo tanto, con la ayuda de los datos de precipitaciones y temperaturas para estaciones hidro – meteorológicas seleccionadas estratégicamente, además de imágenes satelitales correspondiente a días de precipitaciones ocurridas en la zona, se estimará la temperatura índice para dichos días de precipitación, con lo cual se podrá calibrar la fórmula (4).

3.3 Estaciones hidro - meteorológicas seleccionadas.

Para cumplir con los objetivos deseados en este trabajo, se escogieron 5 estaciones hidro meteorológicas ubicadas en la zona altiplánica próximas a la Cordillera de Los Andes. Se utilizó como base la información referente a las precipitaciones diarias y temperaturas extremas diarias, las que se obtuvieron gracias a la DGA mediante el Centro de Investigación de Recursos Hídricos (CIRH).

3.3.1 Estación Coyacagua

La estación Coyacagua está ubicada en la primera región de Chile a $20^{\circ} 03' 00''$ latitud sur y $68^{\circ} 48' 00''$ longitud oeste, a una altura de 4013 metros sobre el nivel del mar y su cuenca está clasificada como Altiplánica.



Figura 3.2- Ubicación Estación Coyacagua.

Antecedentes básicos

- Precipitaciones diarias

Esta estación cuenta con registros de precipitaciones diarias entre los años 1961 y 2012

- Temperaturas diarias

Se cuenta con los registros de temperaturas mínimas, máximas y medias diarias para el periodo 1961 – 2012.

3.3.2 Estación Ollagüe

La estación Ollagüe está ubicada en la segunda región de Chile a $21^{\circ} 13' 00''$ latitud sur y $68^{\circ} 14' 00''$ longitud oeste, a una altura de 3700 metros sobre el nivel del mar y su cuenca está clasificada como Fronterizas Salar Michincha-R.Loa.



Figura 3.3- Ubicación Estación Ollagüe

Antecedentes básicos

- Precipitaciones diarias

Esta estación cuenta con registros de precipitaciones diarias entre los años 1971 y 2012

- Temperaturas diarias

Se cuenta con los registros de temperaturas mínimas, máximas y medias diarias para el periodo 1973 – 2012.

3.3.3 Estación Linzor

La estación Linzor está ubicada en la segunda región de Chile a $22^{\circ} 13' 00''$ latitud sur y $68^{\circ} 01' 00''$ longitud oeste, a una altura de 4100 metros sobre el nivel del mar y su cuenca está clasificada como Río Loa.



Figura 3.4- Ubicación Estación Linzor

Antecedentes básicos

- Precipitaciones diarias

Esta estación cuenta con registros de precipitaciones diarias entre los años 1973 y 2012

- Temperaturas diarias

Se cuenta con los registros de temperaturas mínimas, máximas y medias diarias para el periodo 1973 – 2012.

3.3.4 Estación El Tatio

La estación El Tatio está ubicada en la segunda región de Chile a $22^{\circ} 22' 00''$ latitud sur y $68^{\circ} 00' 00''$ longitud oeste, a una altura de 4370 metros sobre el nivel del mar y su cuenca está clasificada como Río Loa.



Figura 3.5- Ubicación Estación El Tatio

Antecedentes básicos

- Precipitaciones diarias

Esta estación cuenta con registros de precipitaciones diarias entre los años 1977 y 2012

- Temperaturas diarias

Se cuenta con los registros de temperaturas mínimas, máximas y medias diarias para el periodo 1983 – 2003.

3.3.5 Estación Peine

La estación Peine está ubicada en la segunda región de Chile a $23^{\circ} 41' 00''$ latitud sur y $68^{\circ} 03' 00''$ longitud oeste, a una altura de 2460 metros sobre el nivel del mar y su cuenca está clasificada como Río Loa.



Figura 3.6- Ubicación Estación Peine

Antecedentes básicos

- Precipitaciones diarias

Esta estación cuenta con registros de precipitaciones diarias entre los años 1974 y 2012

- Temperaturas diarias

Se cuenta con los registros de temperaturas mínimas, máximas y medias diarias para el periodo 1974 – 2012.

3.4 Estimación de Temperatura índice

Este procedimiento consistió en tomar datos de temperaturas extremas de las estaciones seleccionadas en días de precipitaciones mayores a 10mm, y estos datos asociarlos a la cota de nieve que entrega las imágenes satelitales para dicho días. La latitud sur, indica la latitud de la estación seleccionada, LN la cota de la línea de nieve según las imágenes satelitales, las cuales se obtuvieron mediante herramientas y datos proporcionados por el sitio web de la NASA, determinando coordenadas correspondientes a varios puntos donde existían índices de nieve, para luego, según esas coordenadas obtener la cota de nieve de dichos puntos. A modo de ejemplo se presentan en las figuras 3.7 a 3.11 las imágenes del satélite MODIS/Terra, las coberturas de nieve para la tormenta 3, desde donde se obtuvieron las líneas de nieve asociadas con dicha tormenta. Las restantes fotos satelitales de las tormentas analizadas, se presentan en anexo N° 6.

El satélite MODIS/Terra tiene una velocidad de lectura de 20,3 Rpm, velocidad de datos de 10,6 Mbps y una resolución espacial máxima de 250 m.

- Índice de nieves (1  100%),

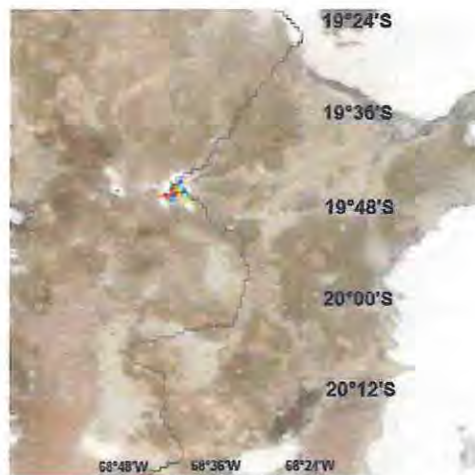


Figura 3.7- Índice de Nieve, Latitud 19°36'S – 20°12'S

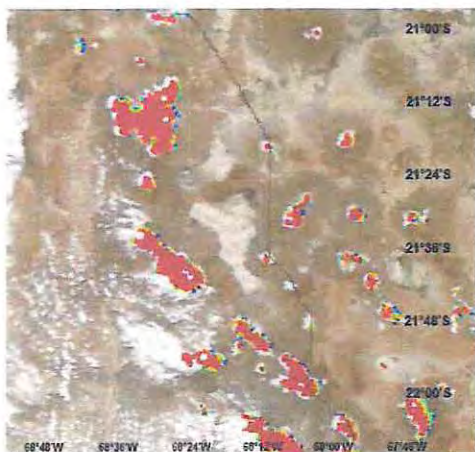


Figura 3.8- Índice de Nieve, Latitud 21°00'S – 22°00'S

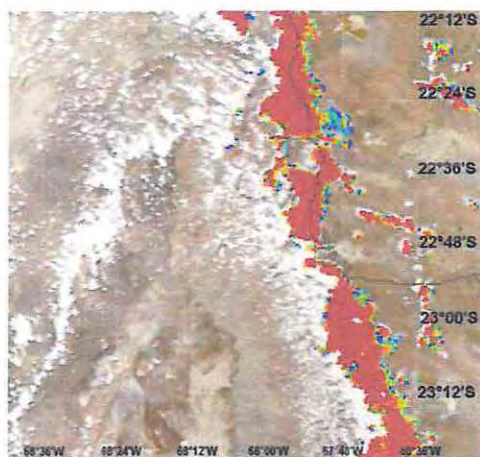


Figura 3.9- Índice de Nieve, Latitud 22°12'S – 23°12'S

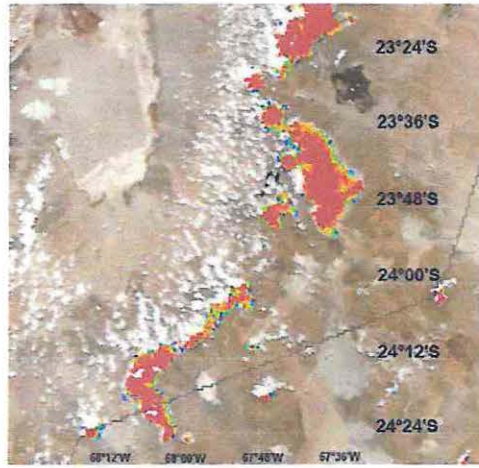


Figura 3.10- Índice de Nieve, Latitud 23°24'S – 24°24'S

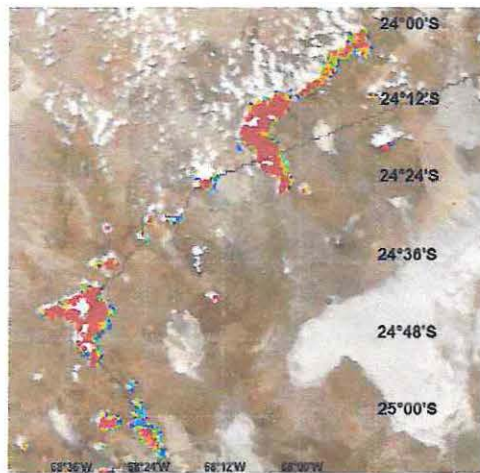


Figura 3.11- Índice de Nieve, Latitud 24°00'S – 25°00'S

Para obtener la temperatura índice se utilizó la siguiente fórmula

$$LN = C_{estación} - \frac{Ti - 0.9}{\Gamma_s}$$

Donde

LN : Cota línea de Nieves imágenes satelitales

$C_{estación}$: Cota estación.

T_i : Temperatura índice en la cota de estación.

Γ_s : Gradiente Adiabático húmedo.

De donde, junto a la fórmula (4), se puede obtener la temperatura índice y el factor k para dicha precipitación, con un Gradiente Adiabático Húmedo.

Latitud Sur	Tmax	Tmin	Tmed	LN satelital	Cota estación	Ti	K
20.05	16.6	1.0	8.8	5899	4010	11.3	1.52
20.05	16.0	3.8	9.9	5891	4010	11.2	1.64
20.05	15.8	2.7	9.3	5883	4010	11.2	1.54
20.05	15.4	1.5	8.5	5879	4010	11.2	1.44
21.22	15.0	5.0	10.0	5783	3700	12.4	1.36
21.22	14.9	5.4	10.2	5776	3700	12.3	1.37
21.22	15.7	5.0	10.4	5781	3700	12.3	1.46
21.22	15.3	5.0	10.2	5774	3700	12.3	1.41
21.22	14.5	4.0	9.3	5765	3700	12.3	1.27
22.22	15.0	-3.4	5.8	5701	4100	9.7	1.40
22.22	14.9	-0.7	7.1	5698	4100	9.7	1.50
22.22	15.3	0.3	7.8	5603	4100	9.2	1.69
22.22	13.5	1.1	7.3	5612	4100	9.2	1.53
22.22	12.3	3.0	7.7	5650	4100	9.4	1.45
22.37	12.2	1.0	6.6	5607	4370	7.7	1.67
22.37	12.0	1.4	6.7	5597	4370	7.6	1.70
22.37	11.0	1.2	6.1	5601	4370	7.7	1.51
22.37	13.2	1.8	7.5	5611	4370	7.7	1.92

Tabla 1: Temperaturas índices y Factor k . Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla 1, los valores de Temperatura índice se encuentran sobre la temperatura media, lo cual tiene relación con la naturaleza de precipitación que

se presenta en la zona en estudio, como se mencionó en el punto 3.1, dando como resultados del factor k valores comprendidos entre 1,27 y 1,92, con un valor promedio de 1,52.

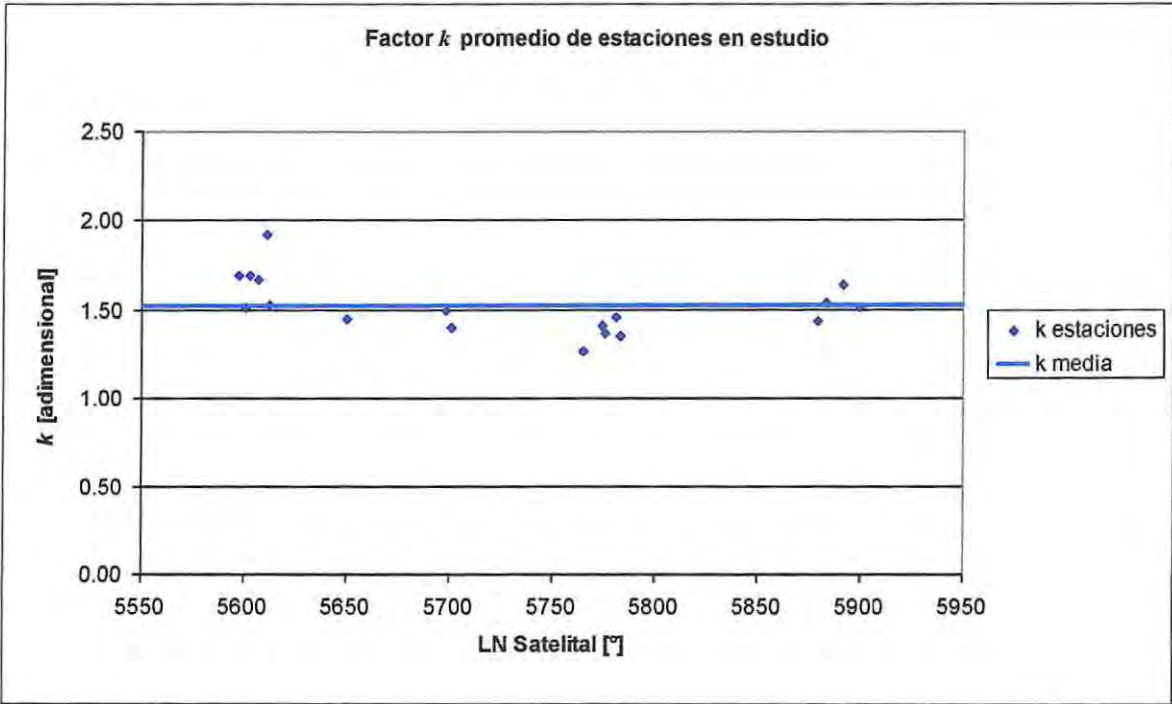


Figura 3.12- Factor k promedio de estaciones en estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Por lo tanto, para este estudio se utilizará las temperaturas índices, según la fórmula (3), evaluadas en un $k=1,5$.

4 CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE BONDAD DE AJUSTE

4.1 Recopilación de datos

Con las estaciones hidro – meteorológicas seleccionadas, se procedió a realizar la recopilación de los antecedentes básicos para los periodos de Invierno, Otoño-Primavera y Verano.

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Elevación [msnm]	Registro [años]
Coyacagua	20° 03'	68° 48'	4013	51
Ollagüe	21° 13'	68° 14'	3700	39
Linzor	22° 13'	68° 01'	4100	38
El Tatio	22° 22'	68° 00'	4370	20
Peine	23° 41'	68° 03'	2460	38

Tabla 2: Estaciones hidro – meteorológicas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

Para cada estación se separó en principio la estadística de precipitaciones y temperaturas en tres épocas, las que corresponden a periodo de invierno, Otoño-Primavera y verano, tal como se realizó en el trabajo de Covián.

Posteriormente en cada estación se seleccionó como parámetro de discriminación los días en que la precipitación fuese superior a 10[mm], sin embargo, como las estaciones seleccionadas se encuentran ubicadas en la zona altiplánica del norte de Chile, donde la concentración de precipitación se presentan en época de Verano, cuando llegan a la zona masas de aire húmedas provenientes de la cuenca amazónica Boliviana, fenómeno conocido como Invierno Altiplánico o Invierno Boliviano, generó que para las épocas de Invierno y Otoño-Primavera la estadística que cumpliera dicho criterio fuera escasa, resultando difícil realizar un análisis probabilístico representativo, por lo que se permitió que para las estaciones Coyacagua se utilizara para épocas de Invierno y Otoño-Primavera, los días cuya precipitación fuese superior a 5 [mm], y para las estaciones restantes cuya precipitación fuese superior a 1 [mm], con el objetivo de aumentar la cantidad de eventos.

Si bien en este estudio se utilizó la temperatura índice (formula 4) como temperatura representativa de las tormentas la cual es función de la temperatura máxima y mínima diaria, en las siguientes tablas, al igual que en el trabajo realizado por Fernando Covián, se presentan para cada estación los valores promedios de precipitaciones sobre el criterio de discriminación descrito anteriormente, temperaturas mínimas diarias y temperaturas máximas diarias.

- **Invierno:**

Estación	Precipitación [mm]	Número Eventos	T° Máxima [°C]	T° Mínima [°C]
Coyacagua	10.9	12	8.3	-3.9
Ollagüe	2.9	11	11.0	-8.3
Linzor	8.4	19	6.3	-5.7
El Tatio	8.6	21	1.9	-6.4
Peine	3.6	45	16.0	6.7

Tabla 3: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de invierno. Fuente: Elaboración propia.

- **Otoño – Primavera:**

Estación	Precipitación [mm]	Número Eventos	T° Máxima [°C]	T° Mínima [°C]
Coyacagua	7.9	21	16.6	-0.5
Ollagüe	2.2	8	14.6	-0.2
Linzor	9.1	5	12.2	-0.2
El Tatio	3.4	11	11.7	-2.5
Peine	3	8	21.2	9.8

Tabla 4: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de Otoño - Primavera. Fuente: Elaboración propia.

- **Verano:**

Estación	Precipitación [mm]	Número Eventos	T° Máxima [°C]	T° Mínima [°C]
Coyacagua	15.1	166	15.6	2.0
Ollagüe	15.1	33	16.1	4.5
Linzor	17.6	156	11.9	1.4
El Tatio	16.6	152	11.2	0.2
Peine	17.1	16	26.0	13.3

Tabla 5: Precipitaciones y Temperaturas promedio para periodo de Verano. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las tablas 3 y 4 correspondientes a las épocas de Invierno y otoño – primavera, a pesar de optar por el criterio de precipitaciones mayores a 1 [mm], el número de eventos de tormenta en las estaciones son escasas, lo cual dificulta el desarrollar un modelo probabilístico representativo. Por lo anterior se adoptó realizar el estudio solo para la época de verano, periodo estacional donde se presentan mayoritariamente las precipitaciones, con valores de magnitud significativos.

A continuación se muestran las gráficas de temperaturas extremas diarias para la época de verano en las distintas estaciones, junto al valor promedio de éstas, las cuales fueron señaladas con anterioridad en la *Tabla 5*.

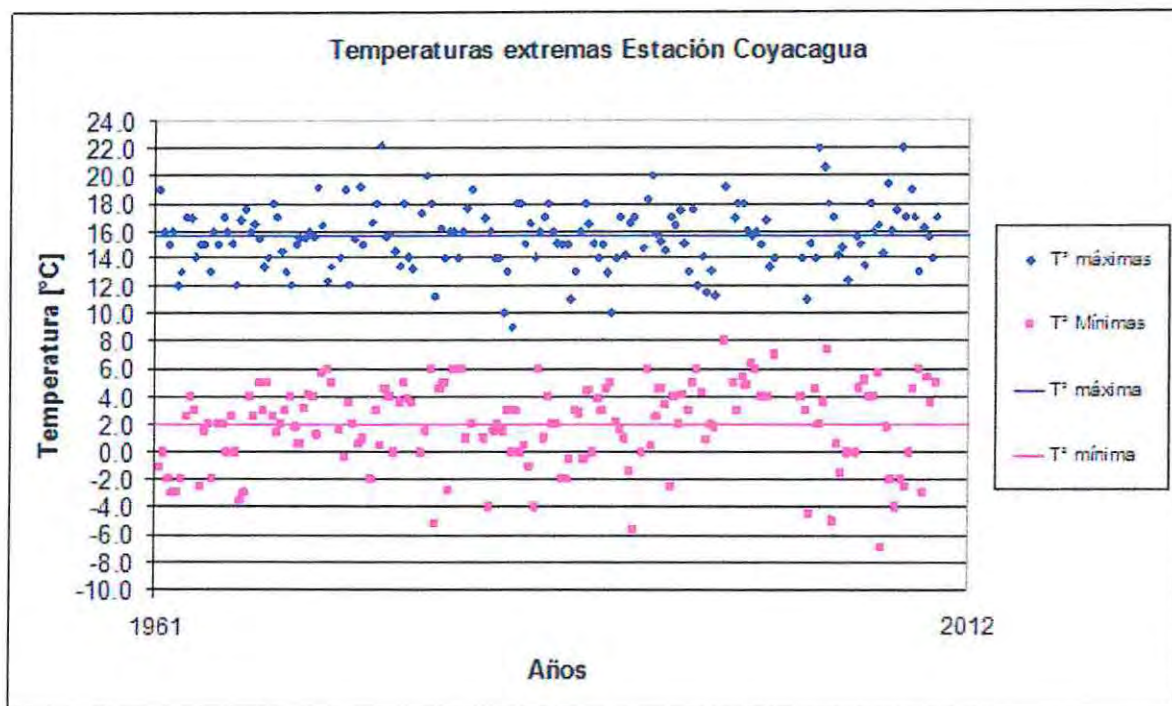


Figura 4.1- Temperaturas extremas Estación Coyacagua. Fuente: Elaboración Propia.

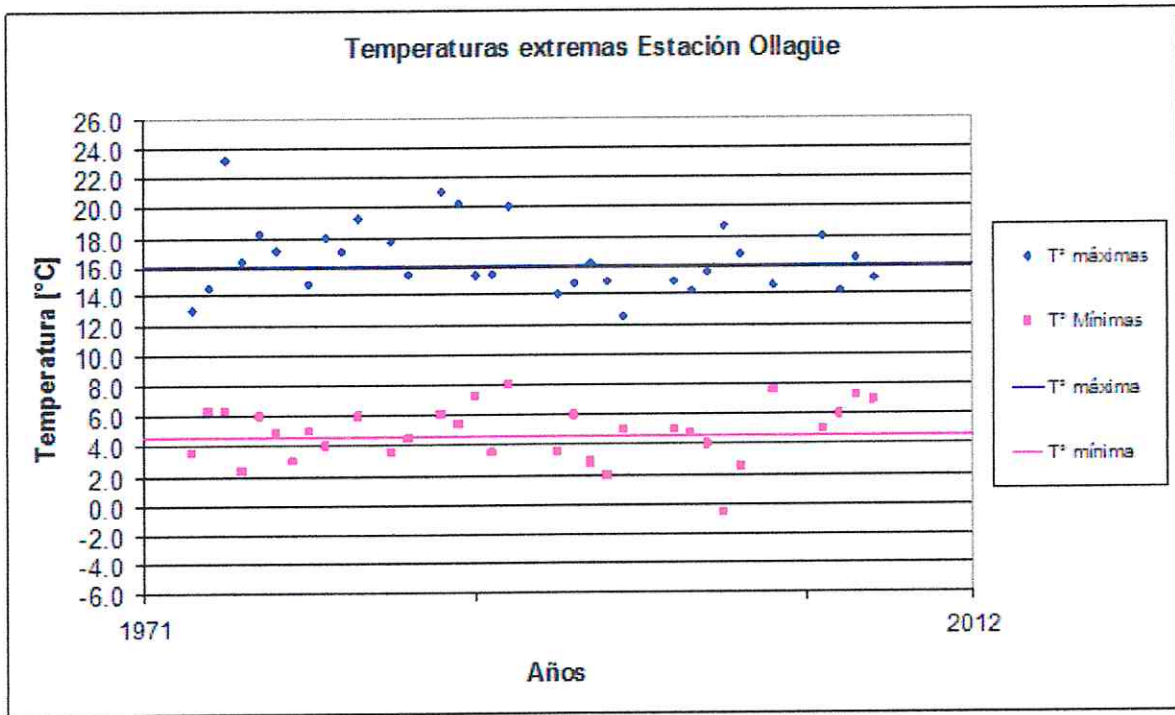


Figura 4.2- Temperaturas extremas Estación Ollagüe. Fuente: Elaboración Propia.

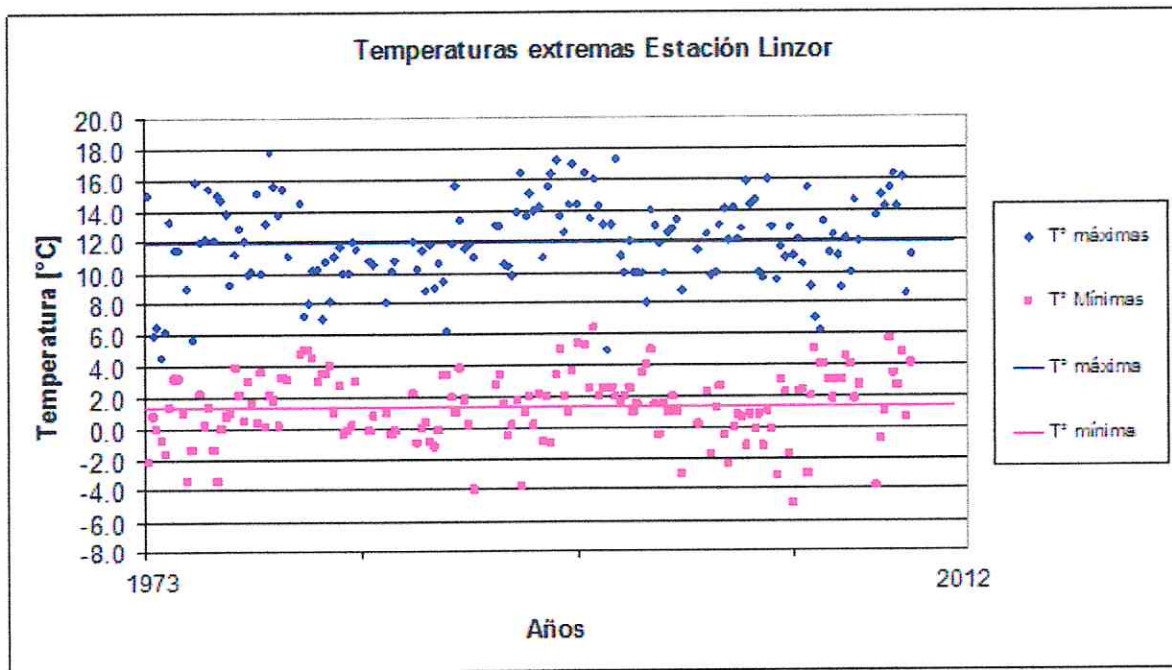


Figura 4.3- Temperaturas extremas Estación Linzor. Fuente: Elaboración Propia.

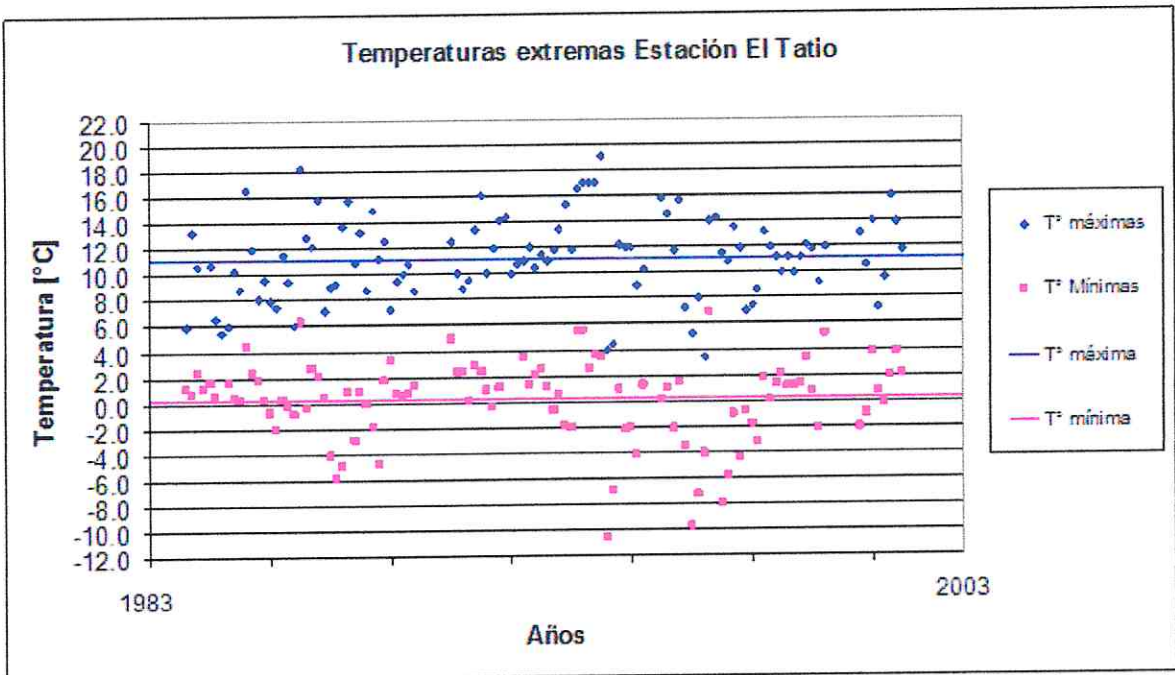


Figura 4.4- Temperaturas extremas Estación El Tatio. Fuente: Elaboración Propia.

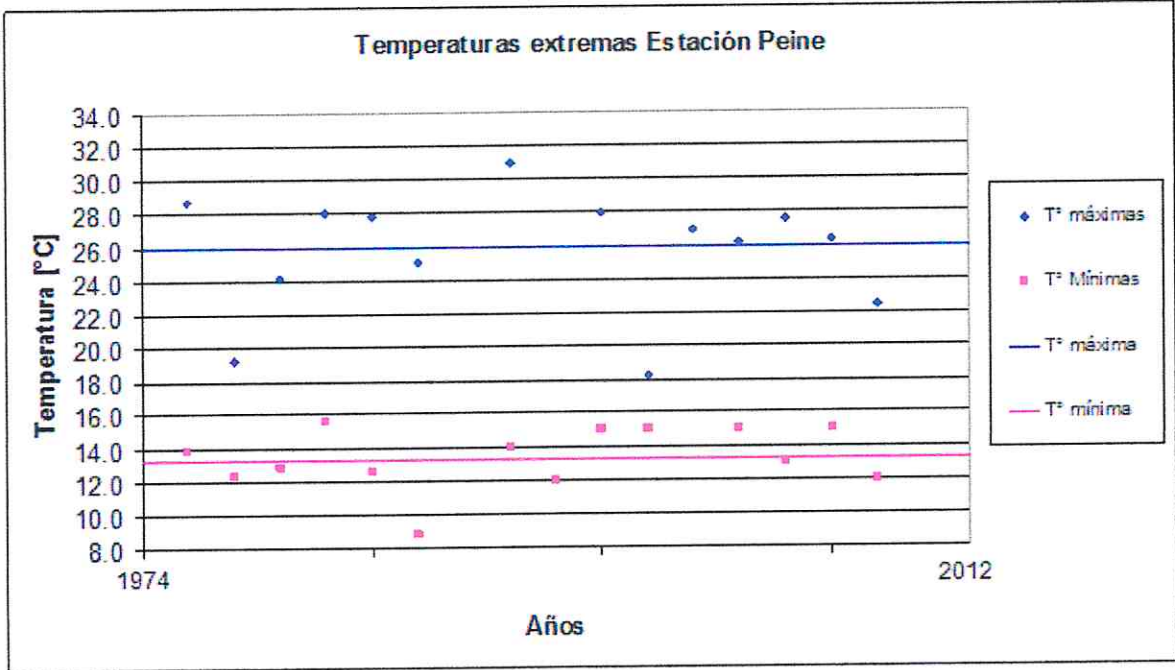


Figura 4.5- Temperaturas extremas Estación Peine. Fuente: Elaboración Propia.

4.2 Correlación entre magnitud de precipitaciones y Temperaturas índices

Luego de haber sido seleccionada la estadística a utilizar en este estudio, se realizó la verificación de la independencia entre magnitud de precipitaciones y temperaturas índices. Para comprobar esta independencia de variables se procedió a calcular el coeficiente de correlación r entre ellas, en donde previamente se calculó la temperatura índice para la estadística seleccionada de acuerdo a la fórmula (4) utilizando como coeficiente $k = 1,5$.

En la tabla N° 6 se puede apreciar el resultado de correlación entre ambas variables, en donde podemos corroborar que estas son independientes entre si, ya que no existe una correlación significativa entre la magnitud de precipitaciones y temperaturas índices,

Estación	Verano
Coyacagua	-0.06415
Ollagüe	0.26845
Linzor	-0.06137
El Tatio	0.17727
Peine	-0.05278

Tabla 6: Coeficiente de correlaciones entre temperaturas y precipitaciones. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis de bondad de ajuste

Para cada estación se realizó un análisis de bondad de ajuste a la estadística seleccionada para cada época del año, la cual fue sometida al test de Chi cuadrado con un nivel de confianza de 95%, $\alpha = 0.05$, y se seleccionó la distribución de mejor ajuste.

Para este test se utilizaron 5 distribuciones teóricas de probabilidad:

- Distribución Normal
- Distribución Log Normal
- Distribución de Valores Extremos Tipo I o distribución de Gumbel.
- Distribución Gamma de 3 parámetros o distribución de Pearson III
- Distribución Log Pearson

Para seleccionar la distribución teórica correcta, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Debe cumplir con el Test de Chi cuadrado, seleccionándose las distribuciones teóricas de mejor ajuste.
- No puede existir una excesiva extrapolación de datos, lo cual se ve reflejado en las probabilidades de excedencia extremas, en donde una distribución teórica puede entregar temperaturas índices con valores muy por encima de las temperaturas índices de la muestra.

En las tablas N° 7 a la N° 11 que se muestran a continuación, se pueden apreciar los resultados de esta prueba, donde la columna derecha representa el valor limite de test Chi cuadrado con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, y la columna izquierda el valor obtenido del test al aplicar la distribución teórica de probabilidad.

Cabe destacar, que en estas tablas se ha remarcado con negrita la distribución teórica de probabilidad con el mejor ajuste. Tampoco debe existir una extrapolación excesiva de datos para las probabilidades de excedencia extremas, ya que esta distribución no sería la más representativa.

- **Estación Coyacagua:**

	Verano	
Probabilidad	$\Sigma(e_i - f_i)^2/e_i$	$\chi^2, \alpha=0.05$
Normal	1.7826	11.0705
Log-Normal	1.6711	11.0705
Gumbel	28.0557	12.5916
Pearson III	35.1032	9.4877
Log Pearson III	37.0598	9.4877

Tabla 7: Bondad de Ajuste para Coyacagua. Fuente: Elaboración Propia.

- **Estación Ollagüe:**

	Verano	
Probabilidad	$\Sigma(e_i - f_i)^2/e_i$	$\chi^2, \alpha=0.05$
Normal	1.1462	11.0705
Log-Normal	1.1586	11.0705
Gumbel	3.8135	12.5916
Pearson III	13.9359	9.4877
Log Pearson III	13.8916	9.4877

Tabla 8: Bondad de Ajuste para Ollagüe. Fuente: Elaboración Propia.

- Estación Linzor:

	Verano	
Probabilidad	$\Sigma(e_i - f_i)^2/e_i$	$\chi^2, \alpha=0.05$
Normal	0.1010	11.0705
Log-Normal	0.1914	11.0705
Gumbel	41.8342	12.5916
Pearson III	24.7511	9.4877
Log Pearson III	26.3606	9.4877

Tabla 9: Bondad de Ajuste para Linzor. Fuente: Elaboración Propia.

- Estación El Tatio:

	Verano	
Probabilidad	$\Sigma(e_i - f_i)^2/e_i$	$\chi^2, \alpha=0.05$
Normal	1.0873	11.0705
Log-Normal	1.1981	11.0705
Gumbel	10.5402	12.5916
Pearson III	35.3325	9.4877
Log Pearson III	34.2217	9.4877

Tabla 10: Bondad de Ajuste para El Tatio. Fuente: Elaboración Propia.

- Estación Peine:

	Verano	
Probabilidad	$\Sigma(e_i - f_i)^2/e_i$	$\chi^2, \alpha=0.05$
Normal	1.5708	11.0705
Log-Normal	1.6285	11.0705
Gumbel	4.5328	12.5916
Pearson III	3.5336	9.4877
Log Pearson III	6.3770	9.4877

Tabla 11: Bondad de Ajuste para Peine. Fuente: Elaboración Propia.

4.4 Resultados del Análisis de Bondad de Ajuste

Luego de realizar el análisis de bondad de ajuste, se procedió a construir la gráfica Temperatura índice versus la probabilidad de excedencia para las distintas estaciones seleccionadas.

En dichas gráficas se muestran los puntos correspondientes a la información hidro meteorológica proporcionada por la DGA y la probabilidad teórica utilizada para cada estación.

La probabilidad de excedencia asociada a la información hidro meteorológica proporcionada por la DGA se calculó de acuerdo a la fórmula (5)

$$P_{excedencia}(x > x_o) = \frac{m}{N+1} \quad (5)$$

Donde $p_{excedencia}$ corresponde a la probabilidad de excedencia para los valores de x mayores a x_o , días de precipitaciones mayores a 10mm, N es el número de datos de la información hidro meteorológica, y m corresponde al número de valores de la información hidro meteorológica de magnitud mayor o igual a x_o . Estos tres valores son adimensionales.

En las figura 4.1 a la 4.5 que se muestran a continuación, se ve claramente que los puntos muestran gran concordancia con la distribución teórica de probabilidad que se utilizó, además de cumplir con los factores mencionados anteriormente en el punto 3.3. Estos gráficos se presentan en escala semilogarítmica y los resultados son los siguientes.

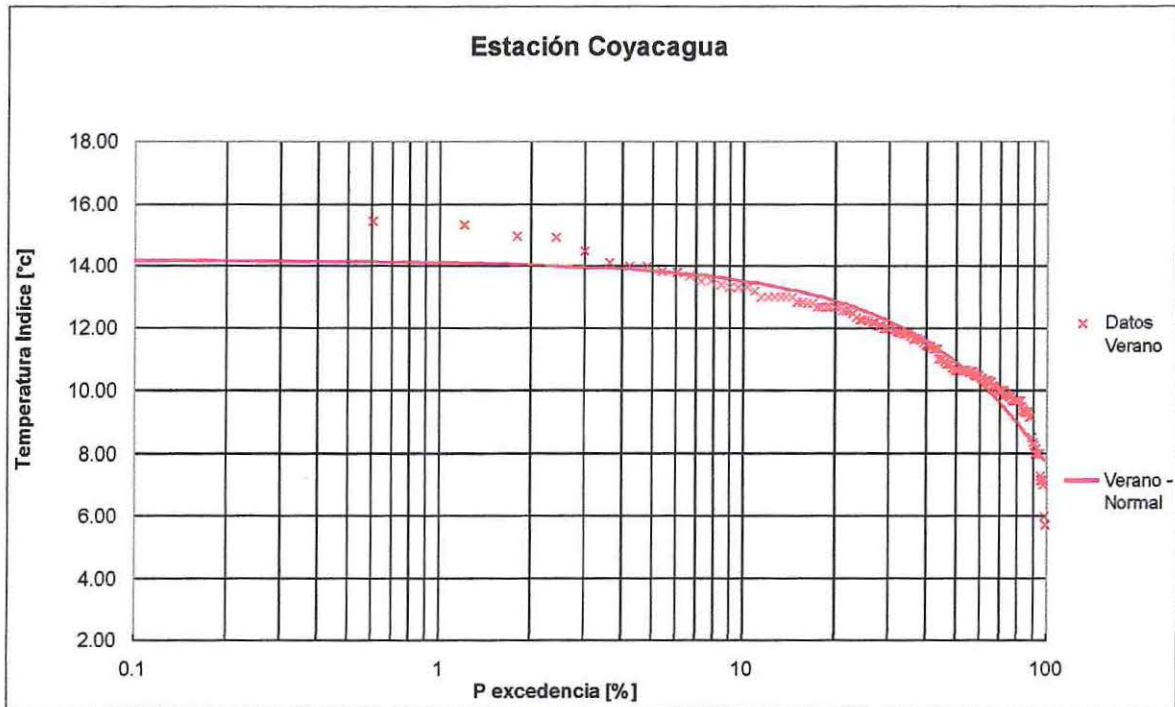


Figura 4.6- Temperaturas índices versus p excedencia para Coyacagua. Fuente: Elaboración propia.

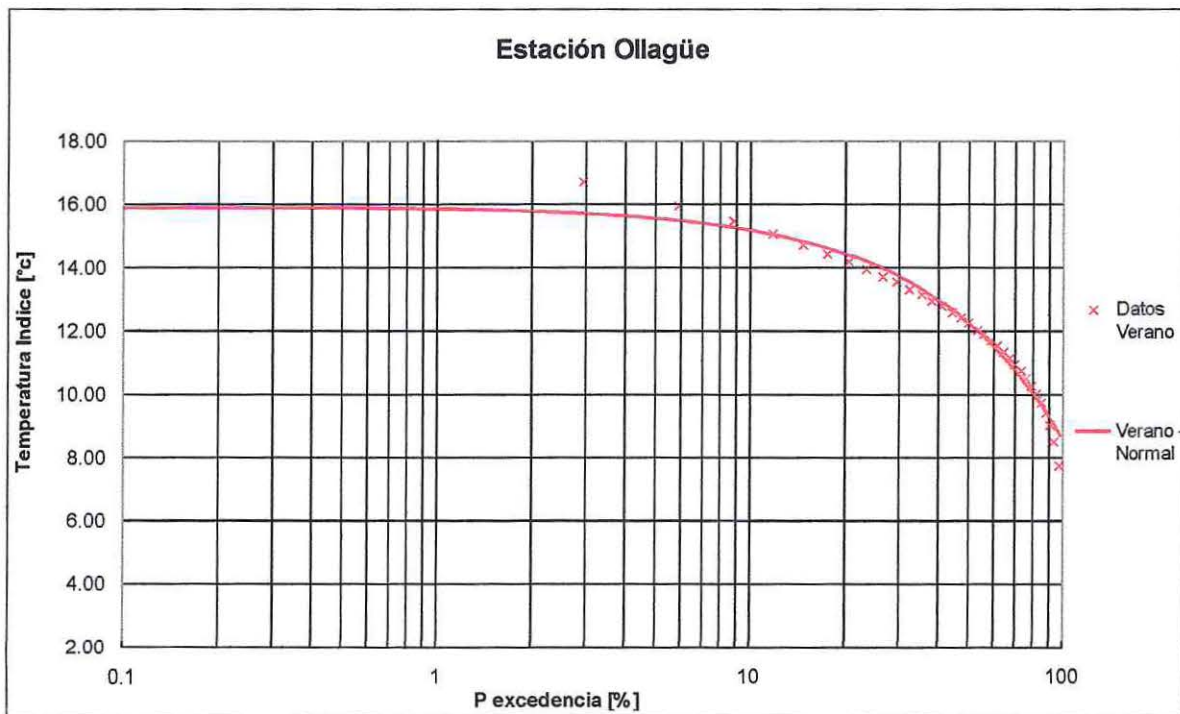


Figura 4.7- Temperaturas índices versus p excedencia para Ollagüe. Fuente: Elaboración propia.

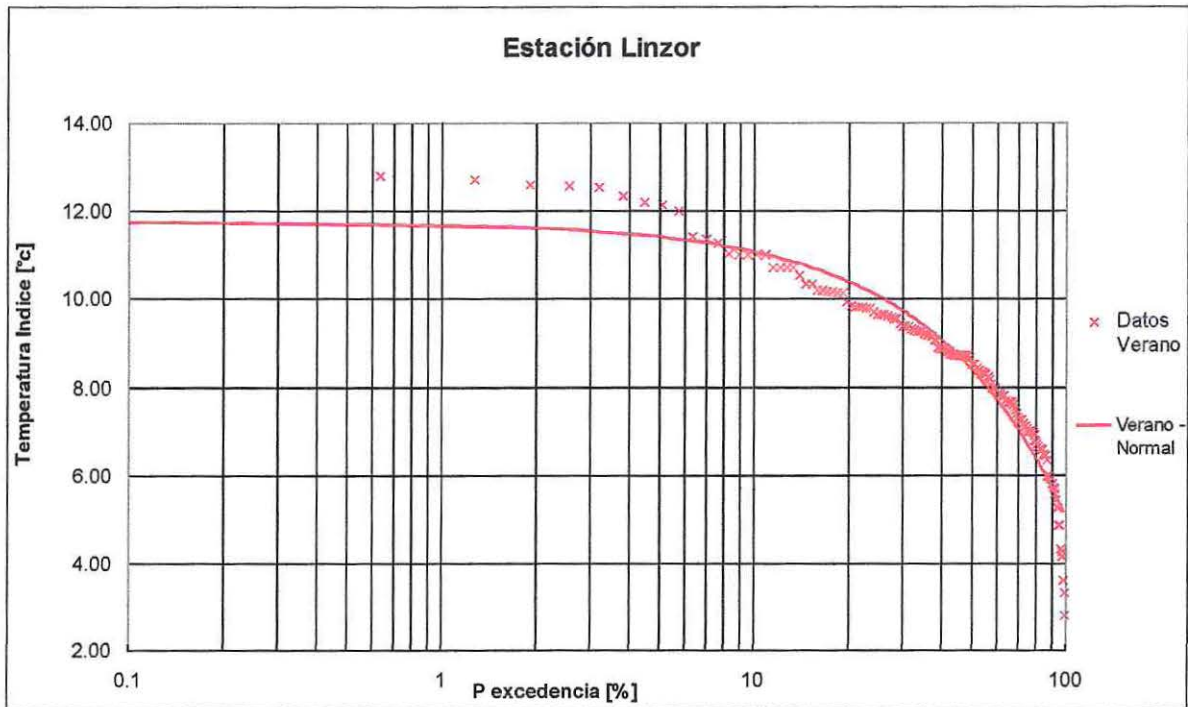


Figura 4.8- Temperaturas índices versus p excedencia para Linzor. Fuente: Elaboración propia.

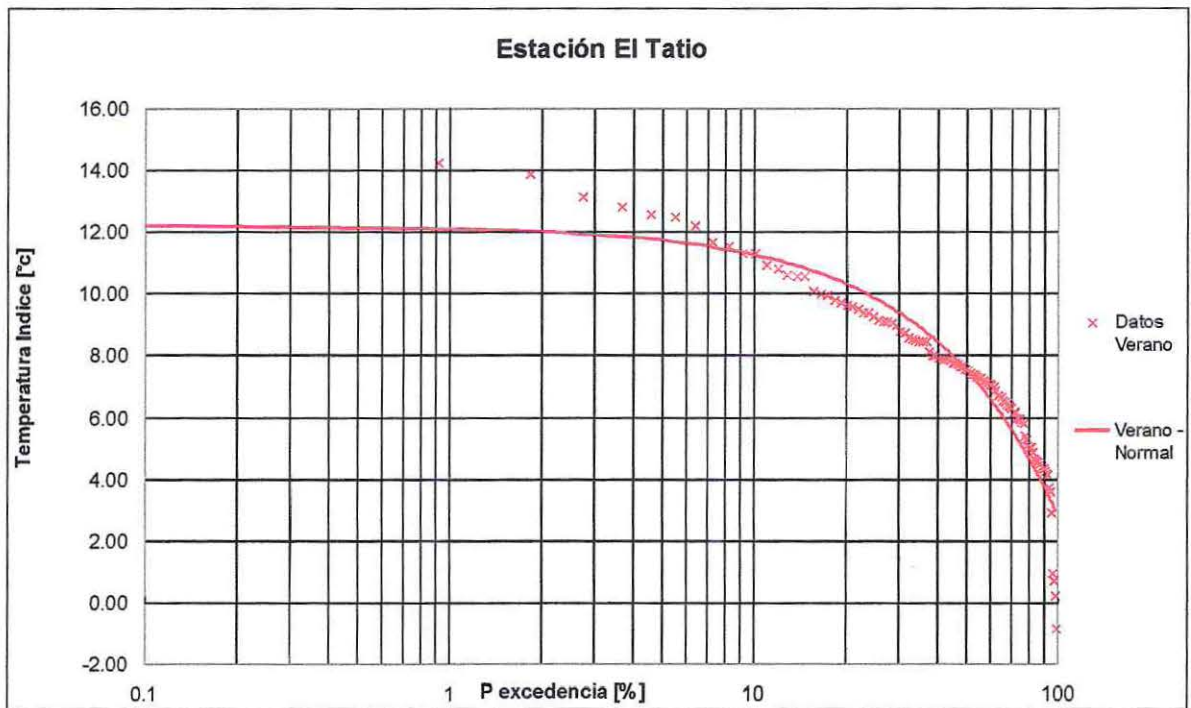


Figura 4.9- Temperaturas índices versus p excedencia para El Tatio. Fuente: Elaboración propia.

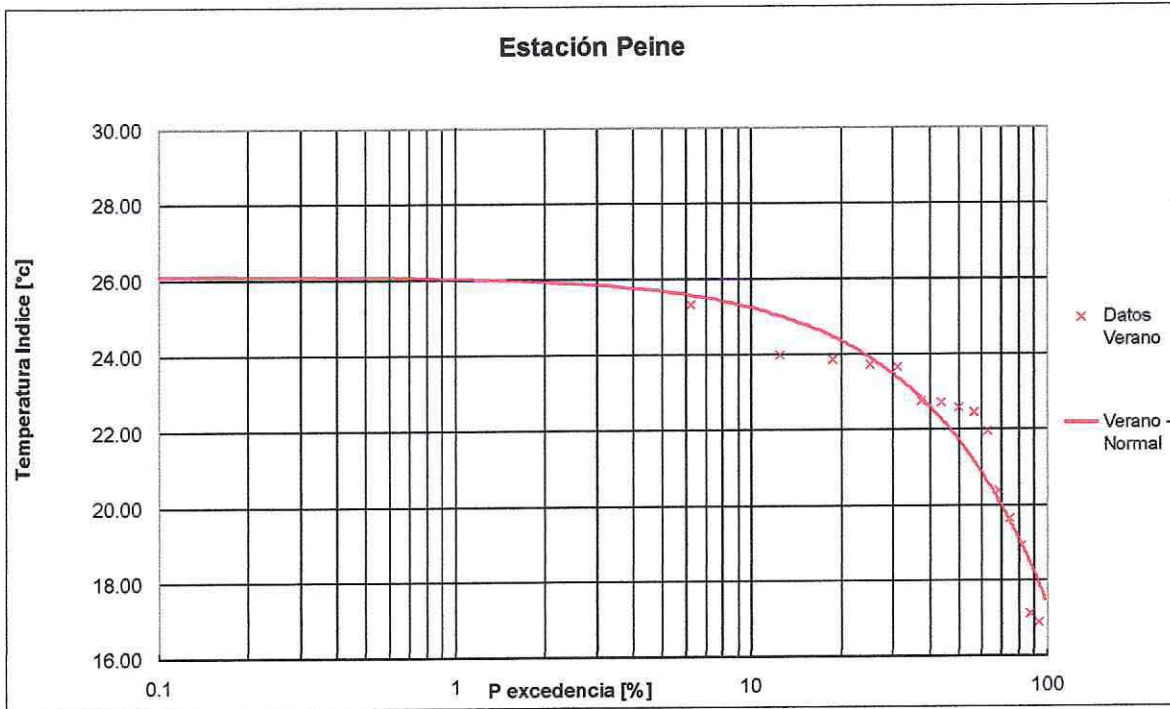


Figura 4.10- Temperaturas índices versus p excedencia para Peine. Fuente: Elaboración propia.

5 CAPÍTULO V: MODELACIÓN DE LA LÍNEA DE NIEVE.

5.1 Gradiente de temperatura para condiciones de tormenta.

El gradiente de temperatura, que consiste en la tasa a la cual desciende la temperatura en función de la altura, es uno de los primeros pasos a determinar para obtener la modelación de la Línea de nieves.

Existen dos tipos de gradientes de temperatura para condiciones ideales.

- $\Upsilon = 6,5$ [°C/km]: Corresponde a un gradiente térmico promedio para una atmósfera de condiciones normales, en la cual la temperatura varía en forma lineal con la altura lo que es usual en la troposfera.
- $\Gamma_d = 9,76$ [°C/km]: Corresponde a un gradiente adiabático seco, el cual ocurre cuando una parcela de aire se desplaza adiabáticamente en la atmósfera, lo que se asemeja a situaciones reales debido a que los tiempos de movimientos son rápidos con un intercambio de calor mínimo.

Aun que estos gradientes son válidos para condiciones de aire ideal y seco, estos valores pueden usarse para el caso del aire real con algún contenido de humedad, ya que el contenido de vapor de agua en un aire húmedo es bastante pequeño en comparación a la masa total del aire, lo que lo hace despreciable sobre la tasa de enfriamiento.

Sin embargo, si el aire alcanza la temperatura del punto de rocío y se satura por causas de enfriamiento, el valor deja de ser constante ya que si existe un enfriamiento adicional del aire bajo el punto de rocío, este provocará la condensación del exceso de vapor de agua. Y en efecto, liberará su calor latente de condensación, el que se transformará en calor sensible y se traspasará a la masa de aire lo que hará disminuir la tasa de enfriamiento.

En estas condiciones, el gradiente de temperatura se denomina Gradiente pseudo adiabático húmedo, que está en función de la temperatura y la presión, quedando expresada en la fórmula (9) que se muestra a continuación.

$$\Gamma_s = \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} * \left(\frac{1 + \frac{L * \omega_s}{R_d * T}}{1 + \frac{\epsilon * L^2 * \omega_s}{C_p * R_d * T^2}} \right) \quad (6)$$

Donde

T : Temperatura índice en [°K]

g : Aceleración de gravedad (9,81 [m/s²])

C_p : Calor específico a presión constante del aire seco. (0,24 [cal/gr])

R_d : Constante del aire seco (286,9 [J/kg/°k])

ω_s : Razón de mezcla de saturación del aire.

ε : Razón entre peso molecular del vapor de agua y el peso molecular del aire seco (0,622).

L : Calor latente de condensación

El calor latente de condensación se expresa en la fórmula (7)

$$L = 597,25 - 0,566 * T \quad (7) \quad T: \text{température índice [°k]}$$

La razón de mezcla de saturación del aire se obtiene de la siguiente manera

$$\omega_s = \varepsilon * \frac{e_s}{p_t - e_s} \quad (8)$$

Donde e_s se obtiene de:

$$\ln\left(\frac{e_s}{6,11}\right) = \frac{L * m_v}{R} * \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

5.2 Línea de Nieves con gradiente Pseudo Adiabático húmedo

En este punto se procedió a calcular la línea de nieves para la época de verano utilizando el criterio de un gradiente pseudo adiabático húmedo variable, el cual fue explicado en el punto 5.1 de este Capítulo.

A continuación se muestra en la Figura 5.8 la línea de nieve para las probabilidades de excedencia de 0,50; 0,20 y 0,10.

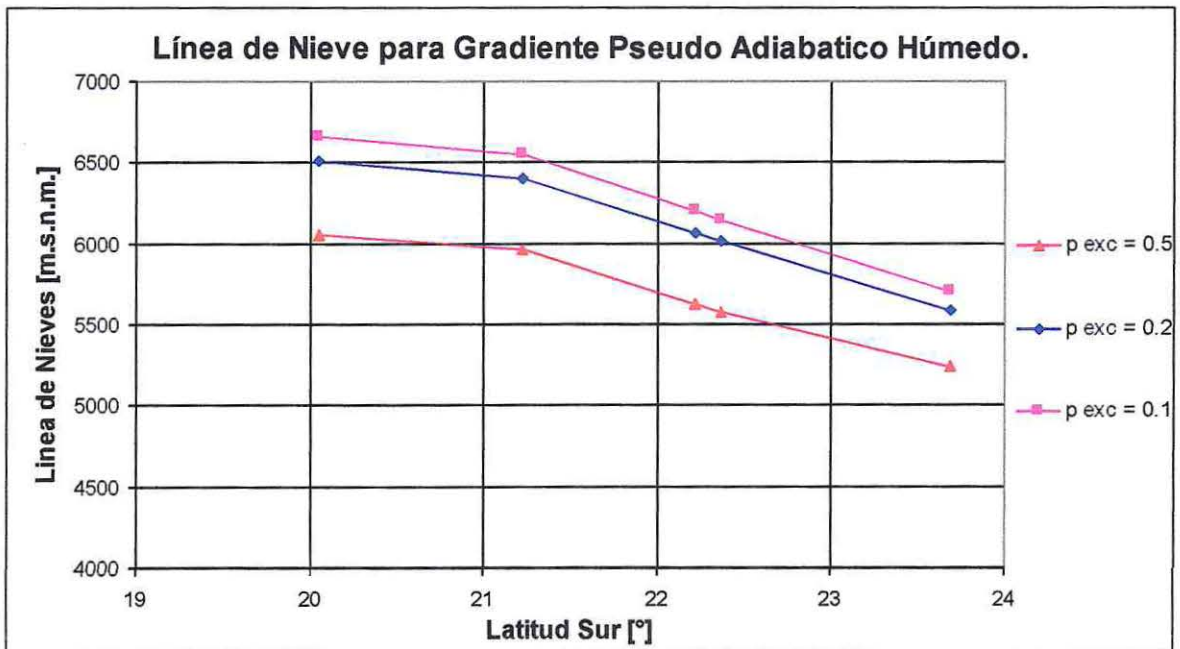


Figura 5.1- Línea de Nieve para gradiente Pseudo Adiabático Húmedo. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 5.1, la línea de nieve obtenida con un gradiente pseudo adiabático húmedo variable, presenta una tendencia marcada de forma decreciente a medida que se avanza hacia el sur.

Esta curva presenta valores de coeficiente de Pearson mayores a 0,7 ($r^2 > 0,7$), lo cual es aceptado en Hidrología.

5.3 Modelación de la Línea de nieve para la I y II región de Chile.

Para cada estación seleccionada en este estudio, se procedió a calcular la Línea de Nieves para verano con un gradiente pseudo adiabático húmedo variable siendo función de la temperatura índice y la presión atmosférica, como se explicó previamente en el punto 5.1.

Este cálculo se hizo para las siguientes probabilidades de excedencia: 0,90; 0,80; 0,75; 0,50; 0,25; 0,20; 0,10; 0,05; 0,04; 0,025; 0,02; 0,01. Y se realizó a través de una planilla Excel llamada LINEA DE NIEVES PSEUDO ADIABATICA, la cual procede a determinar la línea pseudo adiabática húmeda correspondiente respecto a su temperatura índice a nivel del mar, para luego interceptarla con el valor de la temperatura umbral $0,9^{\circ}$ [C].

Los resultados de este cálculo se presentan gráficamente a continuación:

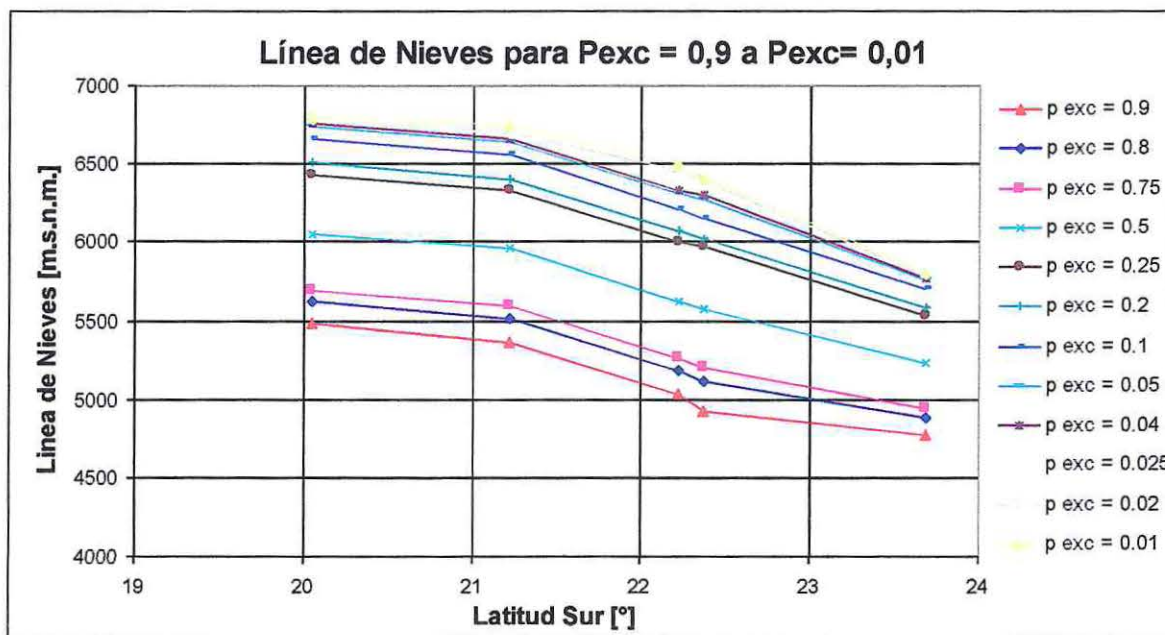


Figura 5.2- Línea de Nieves para $P_{exc} = 0,90$ a $P_{exc} = 0,01$. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Análisis de la Línea de nieves

Como se puede apreciar en el punto 5.3, se obtuvo la línea de nieves en la zona altiplánica de la I y II región de Chile para la época de verano en función de la probabilidad de excedencia, la cual presenta una tendencia a decaer a medida que aumenta la latitud. Esto resulta lógico, ya que en las latitudes bajas del país tales como la I y II región, la oscilación térmica tiende a ser mayor y disminuir a medida que se avanza hacia el Sur, así como se demuestra en el trabajo realizado por Fernando Covián.

Las curvas obtenidas para las diferentes probabilidades de excedencia en época de verano presentan un coeficiente de Pearson con valores mayores a los que se aceptan en Hidrología ($r^2 > 0,70$) por lo que el ajuste a una regresión conocida se cumple satisfactoriamente.

El mecanismo de precipitación en el área de este estudio es del tipo convectivo, el cual tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. Estas masas de aire caliente se generan en verano por el recalentamiento de la superficie o por el enfriamiento de masas de aire asociadas a cuerpos de aguas considerables que pueden provocar el ascenso de masas de aire caliente. El mecanismo de precipitación ocurre cuando esta masa de aire caliente que se genera al recalentarse la superficie, al tener mayor temperatura aumenta su volumen y disminuye su densidad, lo que hace que esta masa de aire caliente ascienda, se enfríe adiabáticamente, se condense y se forme la nubosidad de tipo cumuliforme, lo que da origen a las precipitaciones en forma de chubascos o tormentas, las que se caracterizan por ser de corta duración y gran intensidad.

Las estaciones hidro - meteorológicas utilizadas en este estudio se encuentran ubicadas en la zona cordillerana, por lo que el tipo de precipitaciones corresponde a precipitaciones convectivas y eso se puede corroborar en la estadística de precipitaciones entregada por la DGA, donde para la época de verano existen mayor número de precipitaciones que para las otras épocas.

Por lo tanto, con lo analizado anteriormente se procederá a construir un modelo matemático de mejor correlación con la línea de nieve obtenida en el punto 5.4 para las probabilidades de excedencia correspondientes.

5.5 Comparación con las Imágenes Satelitales

En este punto se procedió a analizar imágenes del satélite MODIS/Terra correspondientes a los días de tormenta para la época de verano. Con la ayuda de estas imágenes, se pudo obtener para días de precipitaciones considerables un índice de nieves, sus coordenadas y elevación respecto al nivel del mar. Gracias a estos datos se pudo estimar la cota de la línea de nieves para días de tormenta en la zona altiplánica de la I y II Región de Chile.

Índice de nieve (1  100%)



Figura 5.3- Índice de Nieves en día de tormenta, I y II Región de Chile.

5.6 Línea de nieves según Imágenes Satelitales.

Con el Satélite antes mencionado, se procedió a rescatar las coordenadas y elevaciones en distintas zonas de la I y II región de Chile donde existen índices de Nieves mayores a 75% para días de tormenta.

En este ejercicio se seleccionaron 3 precipitaciones considerables mayores a 10[mm] que ocurrieron en la zona, y se obtuvieron las elevaciones de nieve según su latitud.

Tormenta 1	
Latitud Sur [°]	Cota nieve [m.s.n.m.]
19.765	5743
20.101	5646
21.217	5467
21.791	5316
21.977	5161
22.065	5162
22.401	5105
22.641	5033
22.753	5050
22.845	5020
23.173	5004
23.439	4945
24.695	4891
24.808	4912
25.496	4860
25.917	4800

Tabla 12: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 1

Tormenta 2	
Lat. Sur [°]	Elevación m.s.n.m.
19.755	5997
20.948	5813
21.906	5742
22.328	5432
23.464	5124
23.615	5195
24.507	4876
24.597	4705
25.004	4712

Tabla 13: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 2

Tormenta 3	
Lat. Sur [°]	Elevación m.s.n.m.
19.752	5470
21.565	5166
21.62	5162
21.809	5060
21.902	4987
22.42	4974
22.508	4940
22.627	4915
23.191	4836
23.688	4718
23.826	4588
24.406	4492
24.525	4487
24.611	4459
24.776	4425
24.912	4393
25.085	4401

Tabla 14: Elevación de la línea de nieves respecto a la latitud para Tormenta 3

A continuación se muestra la gráfica de la línea de nieves generada por las imágenes satelitales y la línea de nieve correspondiente al Modelo matemático obtenido de mejor coeficiente de Pearson $r^2 > 0,7$ con probabilidad excedencia de mayor similitud, cuyos valores se muestran en la Tabla 15 y Tabla 16 del Capítulo VI

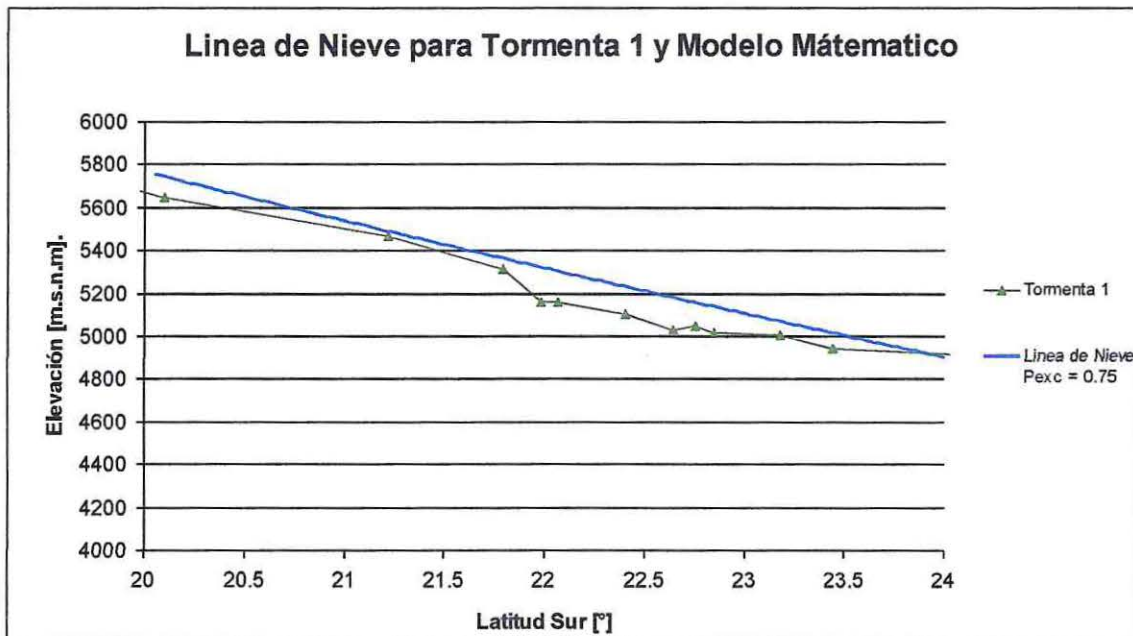


Figura 5.4- Línea de Nieves para Tormenta 1 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.

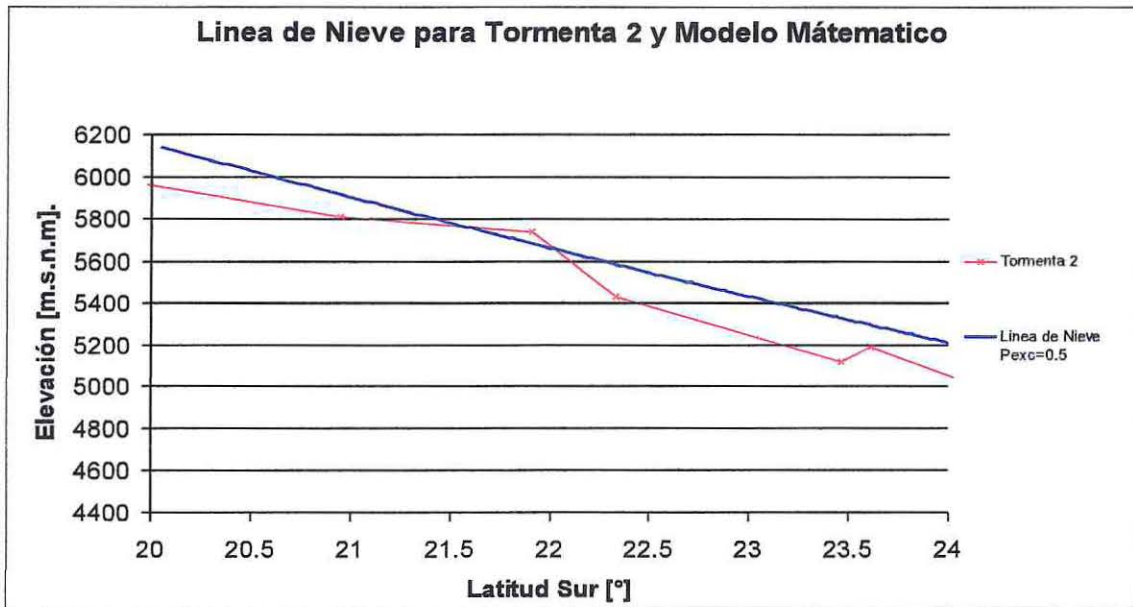


Figura 5.5- Línea de Nieves para Tormenta 2 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.

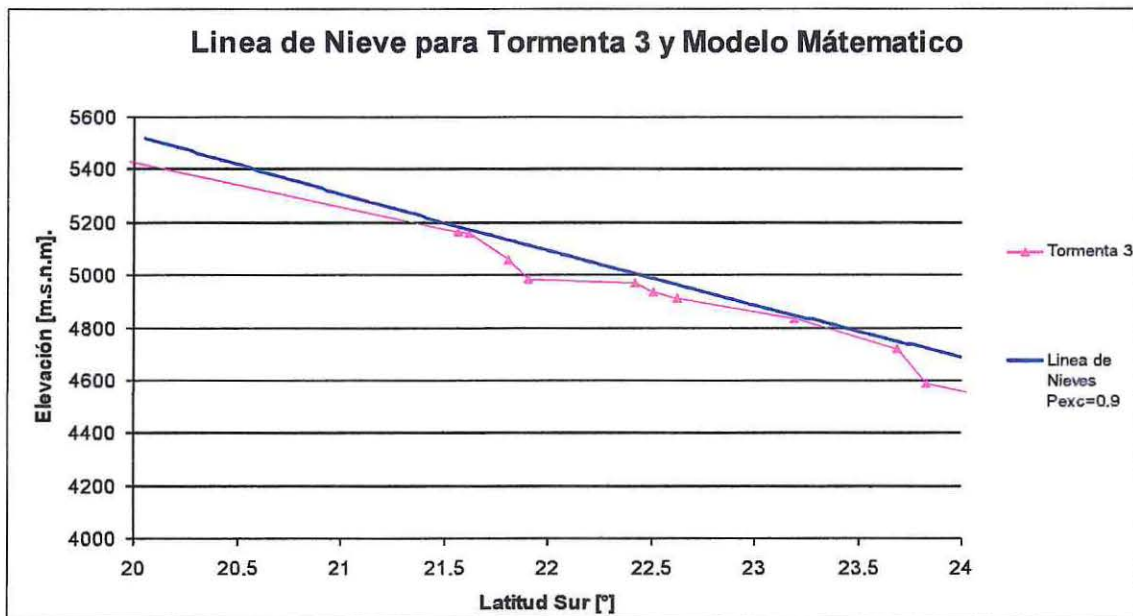


Figura 5.6- Línea de Nieves para Tormenta 3 y Modelo Matemático. Fuente: Elaboración Propia.

Con estos resultados se puede señalar que la hipótesis realizada en este trabajo es adecuada, por lo que se realizará una modelación de la línea de nieves de acuerdo a la hipótesis del mecanismo de precipitación válido para eventos de tormenta del tipo convectivos con un gradiente pseudo adiabático húmedo variable.

5.7 Modelación matemática de la Línea de Nieve en Verano.

Probabilidad de excedencia	Curva de regresión de Modelación de Línea de Nieve	Coefficiente de Pearson
0.9	$C_{LN} = 12659e^{-0.0414*Lat}$	0.9408
0.8	$C_{LN} = 12910e^{-0.041*Lat}$	0.9574
0.75	$C_{LN} = 13059e^{-0.0408*Lat}$	0.9563
0.5	$C_{LN} = 14107e^{-0.0415*Lat}$	0.9526
0.33	$C_{LN} = 14829e^{-0.0418*Lat}$	0.9437
0.25	$C_{LN} = 15203e^{-0.0421*Lat}$	0.9329
0.2	$C_{LN} = 15457e^{-0.0423*Lat}$	0.9283
0.1	$C_{LN} = 15959e^{-0.0427*Lat}$	0.9151
0.067	$C_{LN} = 16183e^{-0.0429*Lat}$	0.9115
0.05	$C_{LN} = 16234e^{-0.0429*Lat}$	0.9056
0.04	$C_{LN} = 16302e^{-0.0429*Lat}$	0.9013
0.033	$C_{LN} = 16176e^{-0.0424*Lat}$	0.8755
0.025	$C_{LN} = 16240e^{-0.0424*Lat}$	0.8674
0.02	$C_{LN} = 16260e^{-0.0424*Lat}$	0.8663
0.0167	$C_{LN} = 16215e^{-0.0421*Lat}$	0.8262
0.0133	$C_{LN} = 16269e^{-0.0422*Lat}$	0.8170
0.01	$C_{LN} = 16294e^{-0.0422*Lat}$	0.8102
0.008	$C_{LN} = 16325e^{-0.0422*Lat}$	0.7967
0.0067	$C_{LN} = 16196e^{-0.0417*Lat}$	0.7350
0.0057	$C_{LN} = 16215e^{-0.0418*Lat}$	0.7314
0.005	$C_{LN} = 16270e^{-0.0419*Lat}$	0.7310
0.004	$C_{LN} = 16355e^{-0.0421*Lat}$	0.7246
0.002	$C_{LN} = 16338e^{-0.042*Lat}$	0.7144
0.00133	$C_{LN} = 16450e^{-0.0423*Lat}$	0.7131
0.001	$C_{LN} = 16410e^{-0.0421*Lat}$	0.7118

Tabla 15: Modelación matemática de la línea de nieves en verano. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

C_{LN} : Cota de línea de nieves para época de verano [m.s.n.m.m.]

Lat: Latitud sur del centro de gravedad de la cuenca pluvio – nival en estudio [°].

6 CAPÍTULO VI: APLICACIONES EN CUENCAS MIXTAS

En este capítulo se presentarán los métodos para determinar las áreas pluviales en cuencas de tipo mixtas, para que de esta manera, la modelación de la línea de nieves obtenida en el Capítulo V sea una herramienta base para determinar los caudales instantáneos máximos de escorrentía directa, y así obtener una modelación de lo que ocurre en condiciones de tormenta para cuencas de tipo mixtas.

6.1 Análisis de Regresión

En este punto se realizará una regresión a la modelación de la línea de nieves obtenida en el Capítulo V.

Las curvas obtenidas presentan una precisa correlación y se pueden verificar con el coeficiente de Pearson, los cuales se encuentran sobre el valor aceptado en hidrología ($r^2 > 0.7$) para todas las probabilidades de excedencia. En la tabla N° 15 se muestra las regresiones obtenidas correspondientes a la línea de nieves en función de la latitud para diferentes probabilidades de excedencia en época de verano, las que son válidas para latitudes comprendidas entre 19° y 24° Latitud Sur. Y de acuerdo a ese modelo, en la tabla N° 16 se mostrará el valor numérico de la línea de nieves.

Las fórmulas señaladas en la tabla corresponden a la curva de mayor ajuste, pero se debe considerar que la línea de nieves mantenga la tendencia a decrecer a medida que se aumenta la latitud, ya que en el caso de una curva polinomial de grado 3 el coeficiente de Pearson puede ser mayor, pero el sentido físico de la curva no sería el adecuado.

Para obtener la Línea de nieves, solo se debe ingresar el valor de la Latitud y la probabilidad de excedencia en la tabla que se muestra a continuación.

Latitud sur [°]	Línea de Nieves para Verano [m.s.n.m.]																
	Probabilidad de Excedencia																
	0.9	0.8	0.75	0.5	0.25	0.2	0.1	0.05	0.04	0.025	0.02	0.01	0.008	0.005	0.004	0.002	0.001
19	5765	5924	6015	6412	6832	6920	7090	7185	7215	7256	7265	7308	7322	7339	7350	7356	7374
19.2	5717	5876	5966	6359	6775	6861	7030	7124	7154	7195	7204	7247	7261	7278	7288	7294	7312
19.4	5670	5828	5918	6306	6718	6804	6970	7063	7092	7134	7143	7186	7200	7217	7227	7233	7251
19.6	5623	5780	5870	6254	6661	6746	6911	7003	7032	7074	7083	7125	7139	7157	7166	7173	7190
19.8	5577	5733	5822	6203	6606	6689	6852	6943	6972	7014	7023	7066	7079	7097	7106	7113	7130
20	5531	5686	5775	6151	6550	6633	6794	6883	6912	6955	6964	7006	7020	7038	7047	7053	7070
20.2	5485	5640	5728	6101	6495	6577	6736	6825	6853	6896	6905	6947	6961	6979	6987	6994	7011
20.4	5440	5593	5681	6050	6441	6522	6679	6766	6795	6838	6847	6889	6902	6921	6929	6936	6952
20.6	5395	5548	5635	6000	6387	6467	6622	6708	6737	6780	6789	6831	6844	6863	6871	6878	6894
20.8	5351	5502	5589	5950	6333	6412	6566	6651	6679	6723	6731	6774	6787	6806	6813	6820	6836
21	5307	5458	5544	5901	6280	6358	6510	6594	6622	6666	6675	6717	6729	6749	6756	6763	6779
21.2	5263	5413	5499	5853	6227	6305	6455	6538	6565	6610	6618	6660	6673	6693	6699	6707	6722
21.4	5220	5369	5454	5804	6175	6252	6400	6482	6509	6554	6562	6604	6617	6637	6643	6651	6666
21.6	5176	5325	5410	5756	6123	6199	6345	6427	6454	6499	6507	6549	6561	6582	6587	6595	6610
21.8	5134	5281	5366	5709	6072	6147	6291	6372	6399	6444	6452	6494	6506	6527	6532	6540	6554
22	5091	5238	5322	5661	6021	6095	6238	6317	6344	6390	6398	6439	6451	6472	6477	6485	6499
22.2	5049	5196	5279	5615	5971	6044	6185	6263	6290	6336	6343	6385	6397	6418	6423	6431	6445
22.4	5008	5153	5236	5568	5921	5993	6132	6210	6236	6282	6290	6331	6343	6365	6369	6377	6391
22.6	4967	5111	5193	5522	5871	5942	6080	6157	6183	6229	6237	6278	6290	6312	6316	6324	6337
22.8	4926	5069	5151	5477	5822	5892	6028	6104	6130	6177	6184	6225	6237	6259	6263	6271	6284
23	4885	5028	5109	5431	5773	5843	5977	6052	6077	6124	6132	6173	6185	6207	6210	6218	6231
23.2	4845	4987	5068	5386	5725	5793	5926	6000	6026	6073	6080	6121	6133	6155	6158	6166	6179
23.4	4805	4946	5027	5342	5677	5744	5876	5949	5974	6021	6029	6070	6081	6104	6107	6115	6127
23.6	4765	4906	4986	5298	5629	5696	5826	5898	5923	5971	5978	6019	6030	6053	6056	6064	6076
23.8	4726	4866	4945	5254	5582	5648	5776	5848	5872	5920	5927	5968	5980	6002	6005	6013	6025
24	4687	4826	4905	5210	5535	5601	5727	5798	5822	5870	5877	5918	5929	5952	5954	5963	5974

Tabla 16: Línea de nieve de diseño para verano. Fuente: Elaboración Propia.

6.2 Determinación del Área pluvial y Área nival.

En el Capítulo V se obtuvo un modelo de la línea de nieves en función de la probabilidad de excedencia y la latitud para la época de verano, la cual será fundamental para la determinación de las áreas pluviales y nivales de una cuenca.

Por lo tanto, se deberá ingresar los siguientes datos para determinar las áreas respectivas.

- Lat:** Latitud sur del centro de gravedad de la cuenca en estudio [°].
T: Periodo de Retorno de diseño [años].
A_{cuenca}: Área total de la cuenca a analizar [Km²]

Luego, se deberá ingresar la curva hipsométrica de la cuenca, la cual se debe conocer de antemano. En el trabajo de Garreaud se postula que las cuencas tienen una suave variación del área con la altura, por lo que el ajuste de polinomios de grado 2 y 3 para ajustar los valores medidos en las curvas hipsométricas se hace posible. Por lo tanto, se propone utilizar la siguiente curva hipsométrica.

$$A(h) = a + b * h + c * h^2 + d * h^3 \quad (10)$$

Donde:

- h:** Cota topográfica de la cuenca [m.s.n.m.m.]
A(h): Superficie de la cuenca acumulada [km²]
a,b,c,d: Coeficientes obtenidos de la curva hipsométrica.

De acuerdo a la ecuación (10) se puede obtener también los valores de altura mínima y máxima de la cuenca. Para el caso de altura mínima se debe igualar $A(h)$ a 0, y para el caso de la altura máxima $A(h)$ a A_{cuenca} . Dando como resultados alturas extremas h_{min} y h_{max} respectivamente.

Finalmente, si los valores obtenidos en la línea de nieves se introducen en la ecuación (10) se obtendrán las áreas acumuladas hasta la intersección con la línea de nieves. Es decir, las áreas pluviales de la cuenca para distintas probabilidades de excedencia. Y por ende, se podrá obtener el área nival de la cuenca con la diferencia entre el área total y el área pluvial obtenida anteriormente.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado en esta memoria, donde se procedió a realizar la modelación de la línea de nieves para la zona altiplánica de la I y II región de Chile, permite comprender de mejor forma el mecanismo de precipitación que existe en la zona de estudio y en las estaciones donde se efectúa control hidro - meteorológico.

Los resultados obtenidos indican que en la zona donde se realizó el estudio, las precipitaciones en época de invierno y otoño-primavera son casi nulas, lo que impidió hacer un análisis probabilístico para dichas épocas. Sin embargo, para época de verano donde las precipitaciones se presentan en mayor cantidad, dan a entender que el mecanismo de precipitación que se presentan en la I y II Región de Chile es de distinta naturaleza a las que se presentan comúnmente a lo largo del país.

Esto se ve reflejado en la estimación de la temperatura índice para la zona en estudio, donde la línea de nieve arrojada por distintas imágenes satelitales entregó un valor del coeficiente $k=1,5$, con el cual, la hipótesis de la existencia de un mecanismo local de precipitación se cumple, dando una línea de nieves decreciente a medida que se avanza al sur. Esto se debe a la configuración geográfica y climática de la zona en que se realizó el estudio, ya que aquí existe un gran impacto sobre la circulación atmosférica de la región tropical y subtropical de América del Sur durante el verano austral, donde las precipitaciones se presentan en épocas de verano a mayores temperaturas.

Esta hipótesis se fundamenta en las precipitaciones de carácter convectivo, ya que este mecanismo es característico en las zonas cordilleranas y de acuerdo los registros de las estaciones hidro - meteorológicas, las precipitaciones ocurren en tiempos cortos, pero con gran intensidad.

Sin embargo, por la escasa información de precipitaciones del tipo sólida que existe en la zona de estudio, se utilizó un valor de temperatura umbral de $0,9^{\circ}\text{C}$ basado en estudios realizados con anterioridad, por lo que este valor queda abierto para nuevas investigaciones en el futuro, cuando los antecedentes en la zona sean suficientes como para estimar un valor representativo.

Mediante el uso de imágenes del satélite MODIS/Terra, se pudo obtener datos satelitales históricos, con las que se registraron y analizaron los días en que ocurrieron precipitaciones. Con estos registros se obtuvieron las coordenadas de los puntos donde existió un índice de nieve mayor a 75%, y luego con estas coordenadas se pudo obtener la elevación de dichos puntos.

La gráfica de las tormentas presentó una curva muy similar a la obtenida mediante el criterio de modelación basado en el mecanismo convectivo, dando cotas que rodean los valores

calculados para las latitudes comprendidas entre 20° y 24° latitud sur. Por lo que, mediante el modelo probabilístico obtenido, se logró estimar la línea de nieves para las latitudes antes mencionadas.

Finalmente, con los valores de la línea de nieve obtenidos en la tabla 16 y el método descrito en el punto 6.2, se podrá obtener el área pluvial y nival para una cuenca del tipo mixta, y así definir el área aportante de escorrentía directa para el diseño de cualquier obra hidráulica.

REFERENCIAS

- "Hidrología Aplicada" Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays, McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. 1994.
- "Precipitación en el Altiplano Sudamericano: Variabilidad interanual e intraestacional y mecanismos asociados". Patricio Aceituno & Aldo Montecinos. Departamento de Geofísica. Universidad de Chile. I Congreso Iberoamericano de Meteorología. España 1992.
- "Estimación estadística de la Línea de Nieves durante eventos de precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados sur" Humberto Peña & Fernando Vidal, XI Congreso Chileno de la SOCHID 1993.
- "Variabilidad de la Línea de Nieves durante eventos de tormenta utilizando modelación probabilística" Fernando Covián, 2011.
- "Estimación de crecidas de diseño en cuencas mixtas pluvio – nivales" Ricardo Seguel & Ludwig Stöwhas, VII Congreso Nacional de la SOCHID 1985.
- "Manual de Cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica" República de Chile, Ministerio de Obras Públicas, DGA Agosto 1995.
- "Principles of snow hydrology" David R. DeWalle and Albert Rango. USA 2008.
- "Snowmelt Runoff Model (SRM)" Manual de uso. J. Martinec, A. Rango, R. Roberts 2008.
- Tablas de Probabilidad, Instituto de Estadística, Facultad de ciencias básicas y matemáticas PUCV.
- Apuntes del Ramo Hidrología (CIV 511) Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso. Profesor: Pedro Kamann Chacana.
- Hidráulica Aplicada y Sistemas Hidráulicos (CIV 521). Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso. Profesor: Pedro Kamann Chacana.

Anexo 1 Test o Prueba de Chi2

Se acepta la distribución ensayada si:

$$\sum (e_i - f_i)^2 / e_i \leq \chi^2_{(n, \alpha)} \text{ donde la sumatoria se realiza desde } i=1 \text{ a } i=K$$

Donde:

K= número de intervalos

e_i = número de datos según la distribución ensayada a prueba en el intervalo i

f_i = número de datos medidos en el intervalo i

n=grado de libertad de la distribución ensayada

α = intervalo de confianza

$n = K - 1 - N^\circ$ de parámetros de la distribución.

Nº de parámetros distribución Gumbel = 1

Nº de parámetros distribución Normal y Log Normal = 2

Nº de parámetros distribución Pearson III y Log Pearson III = 3

Para un intervalo de confianza de 95% es decir $\alpha = 0.95$, $p = 0.05$ y grados de libertad v, se tiene los siguientes límites:

Anexo 2 Distribución Chi Cuadrado X²

P = Probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el chi cuadrado tabulado, v = Grados de Libertad

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8326	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9893	15,8120	14,8454	14,0111	13,2661	12,5838	11,9463	11,3403
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020	16,9848	15,9839	15,1187	14,3451	13,6356	12,9717	12,3398
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062	18,1508	17,1169	16,2221	15,4209	14,6853	13,9961	13,3393
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030	19,3107	18,2451	17,3217	16,4940	15,7332	15,0197	14,3389
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931	20,4651	19,3689	18,4179	17,5646	16,7795	16,0425	15,3385
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7690	22,9770	21,6146	20,4887	19,5110	18,6330	17,8244	17,0646	16,3382
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555	22,7595	21,6049	20,6014	19,6993	18,8679	18,0860	17,3379
19	43,8194	40,8847	38,5821	36,1908	32,8523	30,1435	27,2036	25,3289	23,9004	22,7178	21,6891	20,7638	19,9102	19,1069	18,3376
20	45,3142	42,3358	39,9969	37,5663	34,1696	31,4104	28,4120	26,4976	25,0375	23,8277	22,7745	21,8265	20,9514	20,1272	19,3374
21	46,7963	43,7749	41,4009	38,9322	35,4789	32,6706	29,6151	27,6620	26,1711	24,9348	23,8578	22,8876	21,9915	21,1470	20,3372
22	48,2676	45,2041	42,7957	40,2894	36,7807	33,9245	30,8133	28,8224	27,3015	26,0393	24,9390	23,9473	23,0307	22,1663	21,3370
23	49,7276	46,6231	44,1814	41,6383	38,0756	35,1725	32,0069	29,9792	28,4288	27,1413	26,0184	25,0055	24,0689	23,1852	22,3369
24	51,1790	48,0336	45,5584	42,9798	39,3641	36,4150	33,1962	31,1325	29,5533	28,2412	27,0980	26,0625	25,1064	24,2037	23,3367
25	52,6187	49,4351	46,9280	44,3140	40,6465	37,6525	34,3816	32,2825	30,6752	29,3388	28,1719	27,1183	26,1430	25,2218	24,3366
26	54,0511	50,8291	48,2898	45,6416	41,9231	38,8851	35,5632	33,4295	31,7946	30,4346	29,2463	28,1730	27,1789	26,2395	25,3365
27	55,4751	52,2152	49,6450	46,9628	43,1945	40,1133	36,7412	34,5736	32,9117	31,5284	30,3193	29,2266	28,2141	27,2569	26,3363
28	56,8918	53,5939	50,9936	48,2782	44,4608	41,3372	37,9159	35,7150	34,0266	32,6205	31,3909	30,2791	29,2486	28,2740	27,3362
29	58,3006	54,9662	52,3355	49,5878	45,7223	42,5569	39,0875	36,8538	35,1394	33,7109	32,4612	31,3308	30,2825	29,2908	28,3361

Anexo 3 Temperaturas índices

En la siguiente tabla se muestran los valores de las temperaturas índices. Los valores corresponden a la distribución teórica de probabilidad de mejor ajuste.

Probabilidad de Excedencia	Temperatura índice con K=1,5 en verano				
	Coyacagua	Ollagüe	Linzor	El Tatio	Peine
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0.9	8.32	9.35	5.75	3.80	18.25
0.8	8.96	10.08	6.41	4.73	19.13
0.75	9.29	10.44	6.75	5.20	19.56
0.5	10.91	12.26	8.41	7.53	21.75
0.33	12.01	13.50	9.53	9.12	23.23
0.25	12.53	14.08	10.07	9.87	23.93
0.2	12.85	14.45	10.40	10.34	24.37
0.1	13.50	15.18	11.06	11.27	25.24
0.067	13.71	15.42	11.28	11.58	25.53
0.05	13.82	15.54	11.39	11.74	25.67
0.04	13.89	15.62	11.46	11.83	25.76
0.033	13.93	15.67	11.51	11.90	25.82
0.025	13.99	15.72	11.56	11.97	25.89
0.02	14.02	15.76	11.59	12.02	25.94
0.0167	14.04	15.79	11.61	12.05	25.97
0.0133	14.06	15.81	11.64	12.08	25.99
0.01	14.08	15.83	11.66	12.11	26.02
0.008	14.10	15.85	11.67	12.13	26.04
0.0067	14.10	15.86	11.68	12.14	26.05
0.0057	14.11	15.87	11.69	12.15	26.06
0.005	14.12	15.87	11.69	12.16	26.07
0.004	14.12	15.88	11.70	12.17	26.08
0.002	14.14	15.89	11.71	12.19	26.09
0.00133	14.14	15.90	11.72	12.19	26.10
0.001	14.14	15.90	11.72	12.19	26.10

Anexo 4 Presión Atmosférica en zonas costeras del norte del país

Estos valores de presión atmosférica fueron obtenidos de la pagina Web española <http://tutiempo.net> que ofrece información climática histórica y a tiempo real para cualquier localidad del mundo. Estos valores se usaron para obtener un promedio de la presión atmosférica, la cual se utilizó para realizar el cálculo de la línea de nieves con la planilla LINEA DE NIEVES PSEUDO ADIABATICO HUMEDO.

Dia	Arica 2006			Iquique 1983			Antofagasta 2004		
	Marzo [H Pa]	Agosto [H Pa]	Octubre [H Pa]	Enero [H Pa]	Junio [H Pa]	Noviembre [H Pa]	Enero [H Pa]	Junio [H Pa]	Noviembre [H Pa]
1	1013.2	1016.6	1015.0	1011.5	1013.4	1016.9	1014.0	1016.3	1013.7
2	1013.4	1018.1	1014.4	1011.2	1014.7	1017.3	1012.0	1014.0	1013.5
3	1011.8	1016.2	1014.0	1011.7	1012.8	1015.9	1011.5	1015.6	1013.4
4	1012.1	1015.5	1013.8	1012.4	1013.8	1017.2	1012.6	1017.4	1015.7
5	1012.8	1014.4	1011.6	1012.9	-	1016.9	1012.3	1017.8	1014.3
6	1013.7	1014.7	1013.8	1011.9	1016.2	1017.4	1012.8	1017.6	1012.0
7	1013.0	1015.0	1013.6	1013.3	1015.8	1017.9	1014.5	1018.0	1014.2
8	1014.0	1015.3	1014.0	1011.7	1015.6	1017.2	1015.2	1018.0	1017.2
9	1012.8	1016.8	1013.7	1009.4	1014.0	1018.1	1014.7	1018.2	1015.4
10	1011.9	1014.8	1016.2	1009.2	1015.8	1017.5	1014.3	1017.9	1015.2
11	1013.5	1015.3	1014.5	1009.7	1016.0	1018.0	1014.4	1017.7	1015.3
12	1011.6	1013.5	1015.7	1009.9	1017.1	1017.7	1015.7	1016.5	1015.1
13	1012.2	1014.1	1016.3	1011.4	1017.8	1018.1	1015.2	1018.4	1015.0
14	1012.3	1014.2	1016.9	1011.1	1016.5	1018.8	1014.3	1016.9	1015.0
15	1012.6	1015.7	1016.5	1010.2	1014.0	1016.0	1014.2	1014.4	1017.1
16	1013.1	1016.4	1015.3	1009.1	1015.8	1018.3	1016.8	1016.0	1017.1
17	1013.8	1015.5	1016.5	1009.7	1016.2	-	1017.1	1014.3	1016.3
18	1012.3	1015.7	1017.7	1010.8	1016.1	1017.6	1016.1	1015.0	1017.2
19	1011.8	1014.8	1015.6	1011.0	1015.3	1014.9	1014.5	1018.1	1017.7
20	1011.2	1014.0	1015.6	1010.0	1015.4	1014.2	1014.0	1020.0	1016.3
21	1011.8	1015.2	1015.4	1011.2	1014.3	-	1016.7	1014.5	1015.9
22	1013.6	1016.3	1014.3	1012.2	1016.8	1015.4	1017.8	1017.1	1014.6
23	1014.2	1014.8	1014.8	1012.0	1018.3	1013.3	1018.3	1016.9	1014.8
24	1013.7	1015.4	1016.1	1012.5	1018.9	1014.4	1017.3	1016.4	1015.5
25	1013.4	-	1015.4	1012.2	1017.6	1016.7	1015.5	1016.1	1017.2
26	1014.3	1014.9	1016.6	1011.3	1017.9	1017.0	1014.6	1018.1	1017.3
27	1013.5	1015.4	1015.5	1013.7	1018.0	1015.8	1015.4	1017.9	1014.7
28	1012.9	1016.0	1016.3	1013.7	1015.4	1013.9	1016.0	1015.7	1014.4
29	1013.2	1016.0	1014.6	1013.3	1015.2	1015.6	1014.4	1015.1	1014.4
30	1012.8	1017.7	1015.6	1013.6	1013.2	1015.7	1013.1	1015.2	1014.5
31	1013.9	1014.9	1016.3	1013.1	-	-	1012.0	-	-

Anexo 5 Procedimiento para utilizar la planilla *CALCULO DE LINEA DE NIEVES PSEUDO ADIABATICA*.

Esta planilla excel fue fundamental para realizar el cálculo de la línea de nieve en condiciones de atmósfera pseudo adiabático húmedo de gradiente variable, como se realizó en el punto 5.3

Este procedimiento es iterativo y se ejecuta de la siguiente manera:

1. Primero, en la casilla B3 se debe insertar el incremento que corresponde a un Δ de altura. Este valor debe ser un número divisor de la elevación de la estación en estudio.
2. En la casilla B4 se debe insertar el valor de la presión atmosférica que existe en la latitud de la estación en estudio, pero a cota 0, es decir la presión atmosférica a nivel del mar. (1013 HPa)
3. Luego, en la casilla B5 se ingresa el valor de la temperatura índice calculada en este estudio para la probabilidad de excedencia y estación correspondiente.
4. Ahora, se hace correr la planilla Excel, utilizando la herramienta *Buscar Objetivo*, donde se deben ingresar los siguientes datos
 - a. DEFINIR CELDA: Se debe ingresar la celda correspondiente a la T° inicial en la elevación donde se encuentra la estación, la cual se obtiene de la columna C.
 - b. CON EL VALOR: Se debe ingresa el valor numérico de la temperatura índice ingresada en el punto 3.
 - c. PARA CAMBIAR LA CELDA: Se ingresa la casilla B5 correspondiente a la temperatura índice ingresada en el punto 3.
 - d. Se hace correr la aplicación y la planilla lo que hará es calcular la temperatura que hay a cota 0, de acuerdo a la temperatura índice que existe en la estación en estudio.
5. Luego se hace un segundo recorrido, utilizando la herramienta *Buscar Objetivo*, y se deben ingresar los siguientes datos
 - a. DEFINIR CELDA: Se debe ingresar la celda C701, la cual una vez hecho el recorrido corresponderá a la temperatura umbral.
 - b. CON EL VALOR: Se debe ingresa el valor numérico de la temperatura umbral, en este caso de $0.9 [^\circ\text{C}]$
 - c. PARA CAMBIAR LA CELDA: Se ingresa la casilla B3 correspondiente al incremento de la iteración.
 - d. Se hace correr la aplicación y la planilla lo que hará finalmente, es calcular la elevación en donde se generan los $0.9^\circ [^\circ\text{C}]$, es decir, la curva se intersecta con la temperatura umbral, dando como resultado en la Casilla K4 la cota de la línea de nieve.
6. Luego este proceso se repite para las otras probabilidades de excedencia y estaciones en estudio.

Anexo 6 Imágenes Satelitales

A continuación se muestran las imágenes satelitales para días de tormenta, donde se muestran en color gradual el índice de nieve (1  100%)

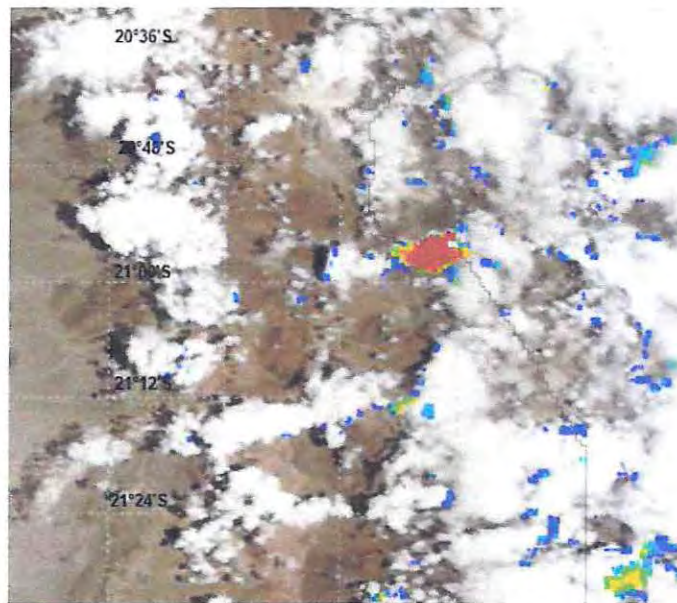


Figura A 7.1 – Índice de Nieve, Latitud 20°36'S – 21°24'S

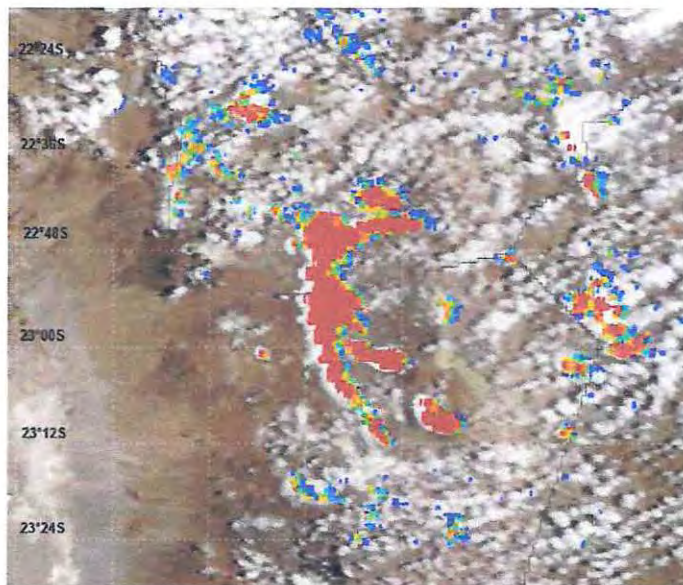


Figura A 7.2– Índice de Nieve, Latitud 22°24'S – 23°24'S

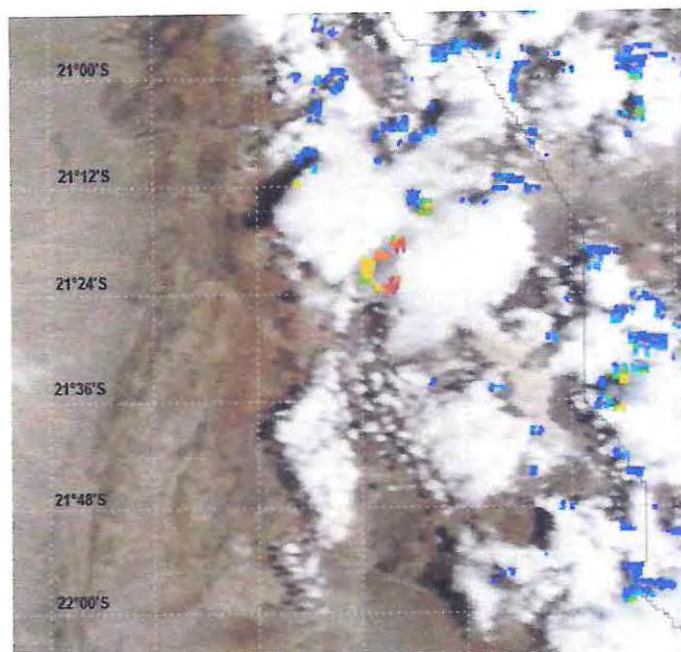


Figura A 7.3 – Índice de Nieve, Latitud 21°00'S – 22°00'S

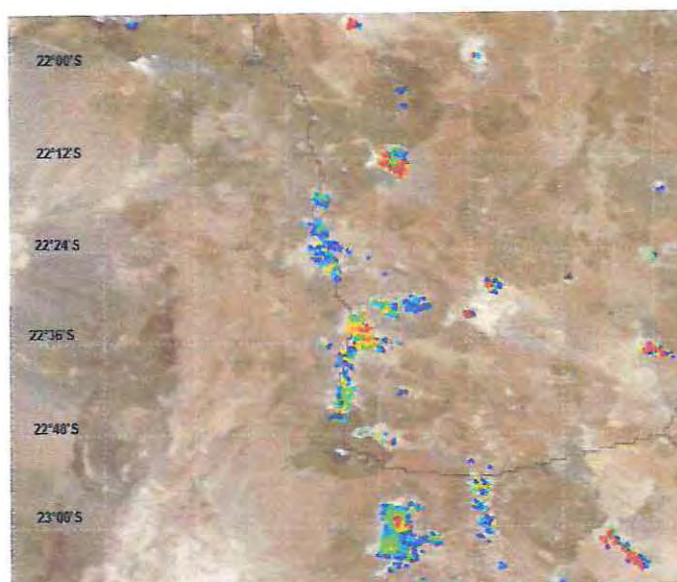


Figura A 7.4 – Índice de Nieve, Latitud 22°00'S – 23°00'S

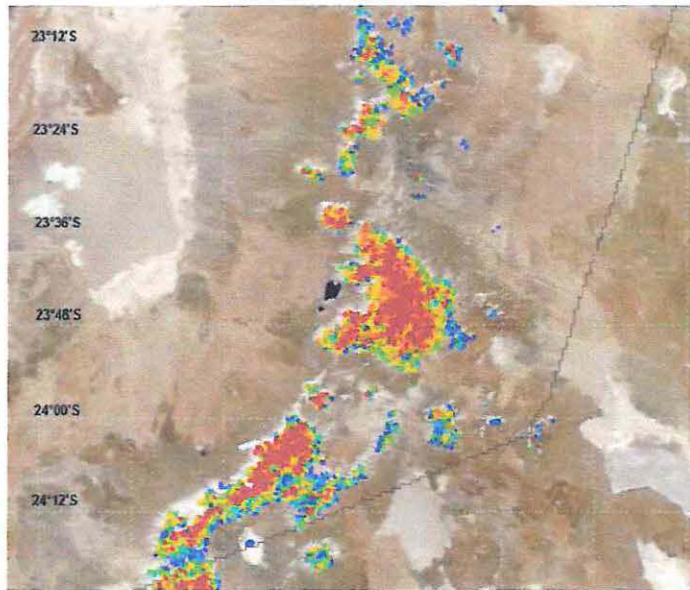


Figura A 7.5 – Índice de Nieve, Latitud 23°12'S – 24°12'S

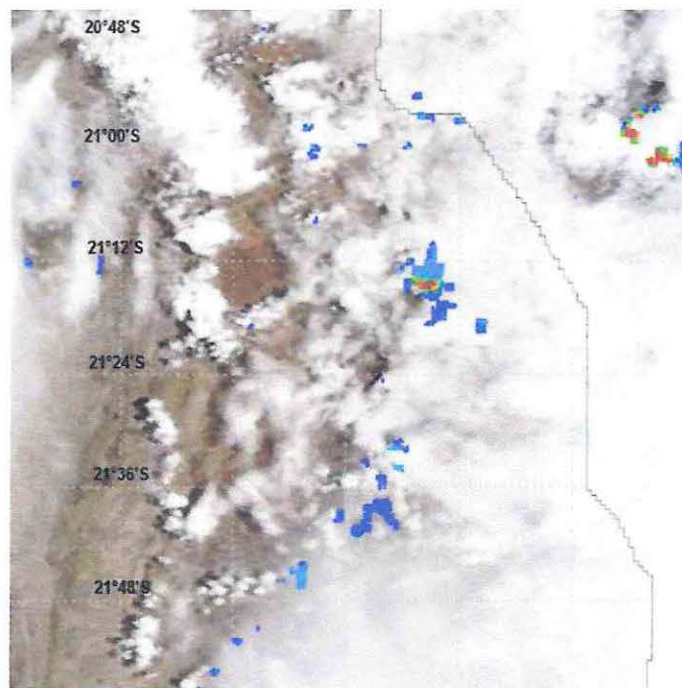


Figura A 7.6 – Índice de Nieve, Latitud 21°00'S – 21°48'S

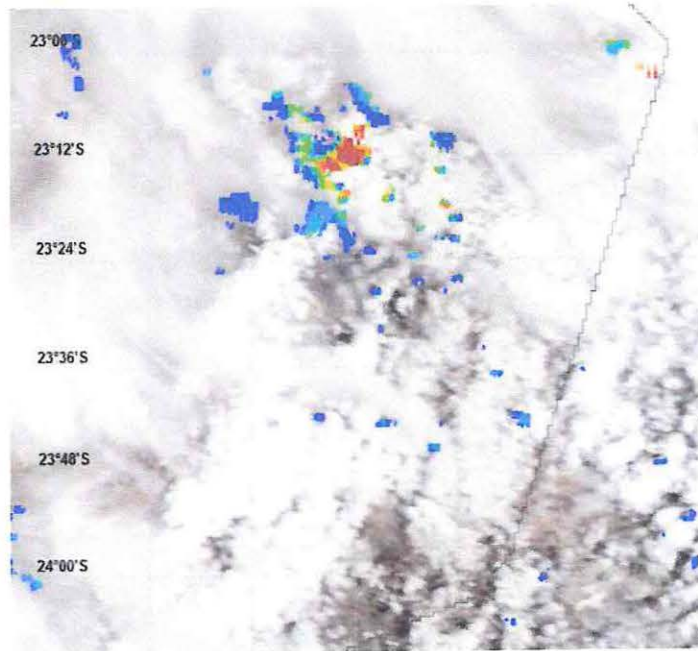


Figura A 7.7 – Índice de Nieve, Latitud 23°00'S – 24°00'S

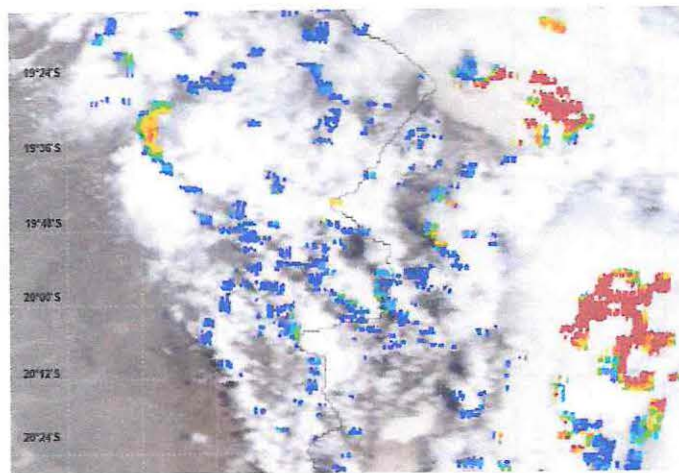


Figura A 7.8 – Índice de Nieve, Latitud 19°24'S – 20°24'S

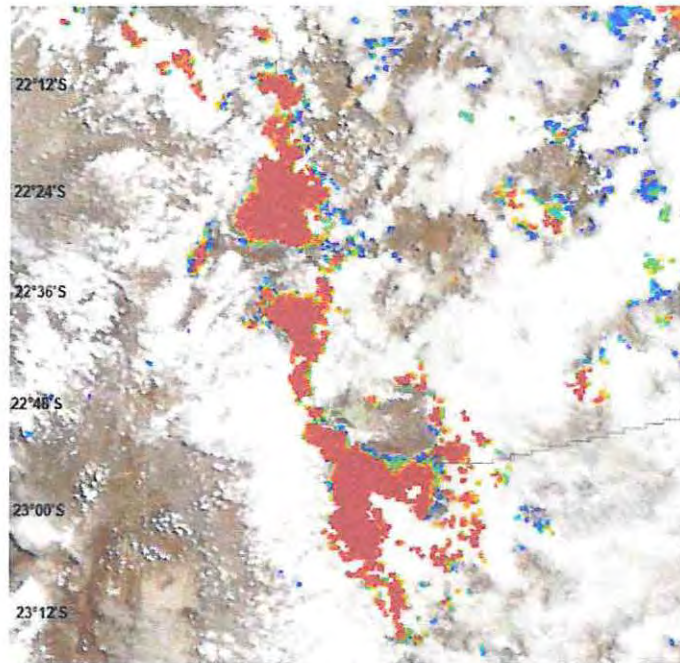


Figura A 7.15 – Índice de Nieve, Latitud 22°12'S – 23°12'S

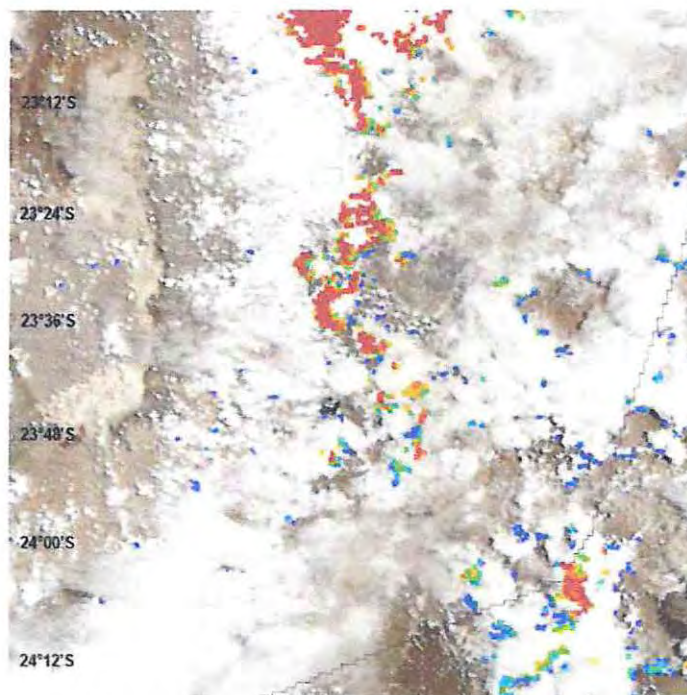


Figura A 7.16 – Índice de Nieve, Latitud 23°12'S – 24°12'S