

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

**PROPUESTA DE UN INDICADOR PARA GENERAR INFORMACIÓN VALIDA Y
OPORTUNA SOBRE LA OCURRENCIA DE HELADAS EN LA REGIÓN DE
COQUIMBO**

INTI HERNÁN MANUEL LEFORT VALENZUELA

Santiago, Chile.

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

**PROPUESTA DE UN INDICADOR PARA GENERAR INFORMACIÓN VALIDA Y
OPORTUNA SOBRE LA OCURRENCIA DE HELADAS EN LA REGIÓN DE
COQUIMBO**

**PROPOSAL OF AN INDICATOR TO GENERATE VALID AND TIMELY
INFORMATION ON THE OCCURRENCE OF FROST IN THE COQUIMBO
REGION**

INTI HERNÁN MANUEL LEFORT VALENZUELA

Santiago, Chile.

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

**PROPUESTA DE UN INDICADOR PARA GENERAR INFORMACIÓN VALIDA Y
OPORTUNA SOBRE LA OCURRENCIA DE HELADAS EN LA REGIÓN DE
COQUIMBO**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

INTI HERNÁN MANUEL LEFORT VALENZUELA

	Calificaciones
Profesor Guía Juan Manuel Uribe M. Ingeniero Agrónomo	6,8
Profesores Evaluadores Manuel Paneque C. Bioquímica, Dr.	6,5
Paulina Aldunce I. Ingeniero Agronomo, Mg. Sc.	6,0

Santiago, Chile.

2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a mi profesor guía Juan Manuel Uribe, que a pesar de su apretada agenda siempre tuvo un tiempo para aconsejarme académicamente y de todo el proceso relacionado con este trabajo.

Agradecer a la Ingeniera en Recursos Naturales Renovables Srta, Carla Reveco quien participó en la génesis de esta memoria y coordinó el proyecto inicialmente.

A las personas que con o sin querer me ayudaron de diferentes formas en este proceso, amigos, compañeros, profesores y familia.

También agradezco a las circunstancias de la vida, que me permitieron recibir una educación la cual me dio la oportunidad de ingresar a esta institución, sé que no todos tenemos esa posibilidad y siempre tengo presente que debo aprovechar lo que a otros se ha negado.

Finalmente a mis padres Yael y Gustavo quienes fueron los que hicieron realidad esas circunstancias, es para ellos mi agradecimiento absoluto, espero hacerlos orgullosos de la forma más importante, como persona.

Índice

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Introducción.....	6
Objetivo General.....	10
Objetivos Específicos.....	10
Materiales y Métodos.....	11
Materiales.....	11
Área de Estudio	12
Características del fenómeno de heladas en la Región de Coquimbo.....	15
Características temporales de las heladas en la región de Coquimbo.....	15
Fechas de las primeras y últimas heladas	16
Histograma de heladas horarias y mensuales	17
Perfil de enfriamiento.....	17
N° de heladas registradas	18
Mapa de temperaturas mínimas.....	18
Identificación de variables meteorológicas críticas y elaboración del modelo.....	19
Modelo lineal y selección de variables “STEPWISE”.....	19
Fórmulas de los modelos.....	21
Error medio cuadrado	21
Sobre-estimación y sub-estimación.....	22
Variables más utilizadas en los modelos	22
Análisis topo climático	23
Perfiles Altitudinales.....	23

Desarrollo del indicador de amenaza.....	24
Alcance del indicador	24
Registros y entradas	25
Procesamiento de la información.....	25
Respuesta del indicador.....	25
Resultado y Discusión.....	26
Características temporales de las heladas en la región de Coquimbo.....	26
Fechas de las primeras y últimas heladas	27
Histograma de heladas horarias y mensuales	28
Perfiles de enfriamiento general y de 3 estaciones seleccionadas	32
Número de heladas registradas	37
Mapa de Temperaturas mínimas.....	38
Variables meteorológicas críticas que determinan al fenómeno de heladas y desarrollo de modelos	40
Fórmulas de los modelos.....	40
Error medio cuadrado	40
Sobre-estimación o Sub-estimación.....	42
Tablas comparativas Variable utilizadas en los modelos	43
Análisis topo climático.....	43
Perfiles altitudinales.....	46
Indicador; capacidad de “predicción” de la amenaza y efectividad del indicador...47	47
Alcance.....	47
Información necesaria para el indicador	47
Procesamiento de la información.....	48

Respuesta del Indicador.....	49
Conclusiones.....	50
Bibliografía.....	51
Apéndice I.....	53
Apéndice II.....	54
Apéndice III.....	58

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de la región de Coquimbo, zona de estudio. Fuente: Elaboración propia..	12
Figura 2. Diagrama de trabajo por objetivo específico, producto final y herramienta utilizada. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 3. Frecuencia horaria de las heladas Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 4. Histograma de frecuencia de heladas mensuales. Fuente: Elaboración propia....	31
Figura 5. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de las diez estaciones seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 6. Tasa de cambio de la temperatura promedio minima horaria en el escenario general. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 7. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 8. Tasa de cambio de la temperatura promedio minima horaria en la estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 9. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Illapel. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 10. Tasa de cambio de la temperatura promedio minima horaria en la estación Illapel. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 11. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Camarico. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 12. Tasa de cambio de la temperatura promedio minima horaria en la estación Gabriela Camarico. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 13. Mapa de la distribución de la T° mínimas de Julio en la región de Coquimbo. Fuente: Uribe <i>et al.</i> 2012.....	38
Figura 14. Acumulación de aire frío por un obstáculo. Fuente: (Castillo y Castellvi, 2001.).....	44
Figura 15. Estratificación de la temperatura en el fondo de los valles y sus laderas. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 16. Integración progresiva de los modelos al indicador Fuente: Elaboración propia.....	48

Figura 17. Perfil Altitudinal estación Llano de Huanta. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura18. Perfil Altitudinal estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura 19. Perfil Altitudinal estación Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.....	59
Figura 20. Perfil Altitudinal estación Vickuña (INIA). Fuente: Elaboración Propia.....	59
Figura 21. Perfil Altitudinal estación Pisco Elqui. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Figura 22. Perfil Altitudinal estación Algarrobo (INIA). Fuente: Elaboración Propia.....	60
Figura 23. Perfil Altitudinal estación Camarico. Fuente: Elaboración Propia.....	61
Figura 24. Perfil Altitudinal estación El Palqui. Fuente: Elaboración Propia.....	61
Figura 25. Perfil Altitudinal estación Huintil. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Figura 26. Perfil Altitudinal estación Illapel. Fuente: Elaboración Propia.....	62

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Características Temporales de las Heladas en distintas estaciones de monitoreo en la región de Coquimbo. Fuente: Currihuinca, 2010.....	27
Cuadro 2. Fechas de la Primera y última heladas de las estaciones seleccionadas para el modelo. Fuente: Elaboración Propia.....	27
Cuadro 3. Frecuencia horaria y acumulada de las heladas. Fuente: Elaboración propia.....	28
Cuadro 4. Distribución de la frecuencia de heladas mensualmente. Fuente: Elaboración propia.....	30
Cuadro 5. Cantidad de horas bajo cero registradas por las estaciones (cada unidad representa una hora donde la temperatura mínima fue igual o inferior a los 0 °C). Fuente: Elaboración propia.....	37
Cuadro 6. Error promedio del modelo respecto al valor observado Fuente: Elaboración Propia.....	40
Cuadro 7. Datos base de las estaciones para su análisis topoclimatico Fuente: Elaboración propia.....	45
Cuadro 8. Relaciones que determina el nivel de amenaza en el indicador. Fuente: Elaboración Propia.....	49
Cuadro 9. Porcentaje de datos sub estimados y sobre estimados por los modelos. Fuente: Elaboración propia.....	53
Cuadro 10. Cantidad de variables por cada modelo según hora y tipo de modelo. Fuente: Elaboración Propia.....	54

RESUMEN

Las heladas son eventos extremos donde la temperatura del aire disminuye a 0° C o menos cerca de la superficie del suelo, por un lapso mayor a 4 horas provocado por diversos factores meteorológicos, así como las condiciones geomorfológicas de la región y los factores topoclimáticos de la zona. Este fenómeno se asocia a un daño a la actividad agrícola generando importantes perjuicios económicos y sociales.

El objetivo de esta investigación es crear un indicador predictivo de heladas para la IV Región el cual traería ventajas para que el usuario tenga la oportunidad de tomar las medidas de resguardo adecuadas. Para lograr lo anterior se dispuso a: 1) Caracterizar el fenómeno de heladas en la región; 2) Identificar las variables meteorológicas que determinan al fenómeno de heladas junto al desarrollo de modelos y 3) Desarrollar un indicador de amenaza capaz de dar alarma cuando la temperatura vaya a alcanzar los 0°C

Como metodología se realizó un análisis bibliográfico, en pos de identificar las dimensiones espaciales, temporales y funcionales dentro del área de estudio. Lo anterior se complementa con el estudio del comportamiento de las variables meteorológicas en relación a la posición topográfica de las estaciones seleccionadas. Luego se utilizó un análisis de regresión múltiple para identificar las variables que tienen mayor incidencia en la génesis de una helada. Mediante el procedimiento estadístico “Stepwise” se seleccionó los factores que explican el fenómeno, determinando la variable más relacionada en los modelos generados. Posteriormente, se aplicó el modelo del indicador de amenaza.

Los resultados evidencian una marcada estacionalidad del fenómeno, junto a que la ubicación del mismo es influenciado por las condiciones topoclimáticas, siendo más frecuentes a mayor altitud. Las variables más incidentes dentro de las regresiones fue la temperatura mínima horaria y en menor grado, la velocidad del viento máxima. Se infiere que por la naturaleza lineal de las correlaciones escogidas estas tienden a la media de los datos, conllevando a una disminución en la precisión a la hora de la predicción de fenómenos que pertenecen a temperaturas extremas.

Se concluye que la realización de estudios a menor escala junto a un análisis topoclimático lograría un indicador más específico y preciso para una zona más acotada, así mismo deben favorecer metodologías con algoritmos no lineales para la modelación, por otro lado se destaca la influencia de la temperatura horaria mínima y la velocidad del viento horaria máxima como las variables meteorológicas más influyentes en la génesis de una heladas.

Palabras clave: Heladas, Indicador, Topoclimatología

ABSTRACT

Frosts are extreme events where the air temperature drops to 0° C or less close to the soil surface for more than 4 hours caused by various meteorological factors within and geomorphological conditions of the region and topoclimatic factors area . This phenomenon is associated with damage to agriculture generating significant economic and social damage.

The objective of this research is to create a predictive indicator for frosts in the IV Region which would bring advantages for the user to have the opportunity to take appropriate safeguard measures. To achieve this the following steps were executed : 1) characterize the phenomenon of frost in the region; 2) Identify the meteorological variables that determine the phenomenon of frost by the development of models and 3) Develop an indicator of threat capable of alarm when the temperature is going to reach 0° C.

A literature review was performed as methodology in order to identifying the spatial, temporal and functional dimensions within the study area. This was complemented with the study of the behavior of weather variables in relation to the topographic position of the selected stations. Multiple regression analysis was then used to identify the variables that have the greatest impact on the genesis of a frost. Using the statistical procedure "Stepwise" factors that explain the phenomenon was selected by determining the related models generated variable. Subsequently, the model was applied threat indicator.

The results show a marked seasonality of the phenomenon, along with the location of it is influenced by topoclimatic conditions, more frequent at higher altitudes being. The more incident within the regression variables was the minimum time and temperature to a lesser extent, the maximum wind speed. It is inferred that by the nature of the model they tend linear average of the data, leading to a decrease in accuracy particulare in phenomenas of extremely temperature like the frosts.

It is concluded that studies on a smaller scale with a topoclimate analysis achieved a more specific and accurate indicator of a particular region, also it should be encouraged methodologies with nonlinear algorithms, also the more important weather variables for the formation of a frost are the hourly minimum temperature and maximum hourly wind speed.

Key Words: Frosts, Indicator, topoclimate.

INTRODUCCIÓN

Las heladas son eventos donde la temperatura del aire disminuye a 0° C o menos cerca de la superficie del suelo, por un lapso mayor a 4 horas (Matias *et al*, 2001), desde el punto de vista meteorológico se considera una helada cuando la temperatura desciende a 0° C a 1.5 m. dentro del abrigo meteorológico (Currihuinca, 2010). El nivel de daño asociado a este fenómeno es variable y depende del lugar donde se produce, la época del año, el tipo de cultivo y su estado fenológico (Castillo & Castellvi, 2001), su intensidad y tiempo de duración (Martínez *et al*, 2007).

Los fenómenos de heladas son influenciados por diversos factores meteorológicos, siendo los más importantes la temperatura del aire, la temperatura del punto de rocío y la velocidad del viento (Chevalier *et al.*, 2012), así como las condiciones geomorfológicas de la región (Oñate, 2010) y los factores topoclimáticos de la zona (Tunarosa, 1969).

Existen principalmente dos mecanismos que gatillan una helada, estos son por advección y por radiación. La helada por advección se produce cuando una masa de aire frío – generalmente de origen polar – llega a la zona afectada, disminuyendo la temperatura y causando un enfriamiento general de la parte inferior de la atmósfera, este tipo de helada por lo general presenta velocidades de viento superior a 10 km/h y es independiente de la nubosidad, siendo más intensa en zonas de gran o media altitud (Villalobos *et al*, 2009). El otro mecanismo (radiación) que gatilla una helada requiere de cielos despejados, calma ambiental (ausencia de viento), temperaturas bajas y que la temperatura de rocío sea inferior a la del aire (Villalobos *et al*, 2009), cuando estos factores se combinan se produce una pérdida de calor del suelo en forma de radiación hacia el espacio, enfriando el aire cercano al suelo (este aire puede estar hasta 2 o 3 C° más bajo que la temperatura registrada por las estaciones de monitoreo (Castillo & Castellvi, 2001), lo que produce una estratificación de las capas de la parte inferior de la atmósfera y en consecuencia una inversión térmica en este sector de la atmósfera desembocando en un situación que mantiene el aire frío en la parte baja (cerca del suelo) mientras que el aire que se encuentra a mayor temperatura circula hacia las partes más altas de la atmósfera. Las heladas de tipo radiativo se producen en las horas próximas a la salida del sol, ya que es en este lapso de tiempo cuando el suelo y el aire han emitido la mayor cantidad de energía y es cuando el sistema tiene la temperatura más baja (Castillo & Castellvi, 2001). Esta última forma de helada es la más común en el Norte Chico de Chile (Martínez *et al.*, 2007; Chevalier *et al.*, 2012) y es la cual esta investigación se hará cargo de estudiar.

Una helada puede dañar los cultivos de dos maneras, por enfriamiento y/o por congelamiento (Chevalier *et al.*, 2012), el enfriamiento afecta los procesos fisiológicos de la planta, como la respiración, la fotosíntesis y la actividad enzimática, mientras que el daño por congelamiento produce daño celular por los cristales de hielo formados al congelarse el agua intra-celular, la cual logra perforar la membrana protectora de la célula (Martínez *et al.*, 2007). El congelamiento puede dañar a la planta con diferente intensidad, si es un congelamiento rápido se forman cristales más grandes de hielo, produciendo más perjuicios a las células, en cambio sí es un congelamiento más lento estos son más pequeños siendo más inocuos (Oñate, 2010).

En Chile el daño que las bajas temperaturas producen en los cultivos, especialmente en frutales, considerando las últimas dos décadas los perjuicios económicos ascienden a US\$ 25 millones, equivalentes a 70 mil toneladas anuales (Currihuinca, 2010). Además, generan un efecto negativo en la oferta laboral relacionada con puestos de trabajo que se pierden debido a la disminución de la producción (Snyder y Paulo de Melo-Abreu, 2010).

El estudio y análisis de este fenómeno, como la caracterización de las variables que modelan el evento y las interacciones que presentan entre ellas, con el objetivo de crear un indicador predictivo traería una concreta ventaja para los agricultores, que al ser advertidos de un eventual fenómeno de baja temperatura tendrían la oportunidad de tomar las medidas de resguardo adecuadas. Es por esto que se propone el desarrollo de un indicador que dé cuenta del fenómeno asociado a la temperatura del aire cuando alcanza los 0° C. Se postula evaluar las condiciones asociadas a la disminución de la T° del aire este valor crítico (0° C), que representa la condición de amenaza en relación al comportamiento de la temperatura del aire, sin considerar las características inherentes a cada cultivo en particular que representarían la vulnerabilidad respecto a una helada. Considerando la disminución de los costos asociados a los sistemas de control de heladas y a las pérdidas a nivel mundial y regional por este fenómeno, es que el indicador adquiere una gran importancia en el área agrícola con el objetivo de disminuir el impacto de las heladas sobre los cultivos. Este tomará en cuenta los siguientes aspectos para lograr a cabo su objetivo; será medible cuantitativamente, comprensible y fácil de usar, tendrá en cuenta tanto la dimensión espacial y la temporal, será objetivo y sensible a los cambios. Para su elaboración se tendrá en cuenta el criterio de costo y disponibilidad de información y su resultado tendrá valor de decisión (Therbug *et al.*, 2005).

Este estudio solo consideró el componente de amenaza, asociada al fenómeno de ocurrencia de heladas de 0°C, sin considerar la vulnerabilidad de los cultivos, la cual está determinada por el estado fenológico, el tipo de cultivo y la época del año, factores que determinan el nivel resistencia a las bajas temperaturas. El desarrollo del indicador estará referido a las características y condiciones que presentan la estación o estaciones seleccionadas y no hará referencia a la especialización del fenómeno que se estudia (no habrá un resultado cartográfico del indicador).

En relación a los esfuerzos realizados con el objetivo de la predicción de temperaturas bajas, estos son preocupación a nivel mundial, por el gran impacto que estos tienen para los cultivos, destacando los trabajos realizados por Smith en 1917, Young en 1920, Kangsier en 1959 y Rogers y Rohli en 1991, estudios centrados en árboles frutales, Hamilton y Tarifa en 1978 y Fortune y Kousky en 1983 estudiaron las características sinópticas asociadas a eventos de heladas en Brasil (Gonzales e Hidalgo, 2009). Otra forma muy extendida de realizar predicción para temperaturas mínimas es realizando redes neuronales, como los trabajos de Bustos, 2012; Jain, 2001; Ovando *et al.*, 2005 y Smith *et al.*, 2006, entre otros autores que han utilizado redes neuronales para la predicción de temperaturas. En Chile las investigaciones realizadas fueron hechas especialmente para la zona Central del país, entre los que se encuentran los trabajos realizados por Santibáñez *et al.*, 1997 y Villarroel, 1980, en el área de estudio destaca el trabajo de Gonzales e Hidalgo, 2009, el cual utiliza los trabajos de Santibáñez *et al.*, 1997 y Villarroel, 1980, y los ajusta para los valles del Elqui y Limarí, ubicados en la región de Coquimbo. La Ecuación 1 muestra el modelo adaptado para la zona central de Chile y los factores meteorológicos incluidos.

$$T_m = T_d - (R_h - N)/5.0 + 10^{R_h/100} + \log T_d \pm 2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Ecuación 1. Ecuación de pronóstico T° min.

Donde

T_m: Temperatura mínima pronosticada (°C)

T_d: Temperatura punto rocío del día anterior (20 hrs.) (°C)

R_h: Humedad relativa del día anterior (20hrs) %

N: Nubosidad (40, cielo cubierto; 30, cielo parcial y 20, cielo despejado) (octas)

Estas investigaciones serán consideradas para el desarrollo de la memoria, tomando en cuentas sus conclusiones y las investigaciones particulares realizadas dentro de la zona de estudio.

Dado el propósito del proyecto donde se enmarca la presente investigación, es necesaria conocer instituciones o sitios que ofrezcan pronósticos de heladas con un enfoque preventivo. A continuación se mencionan portales de internet que otorgan estos servicios.

Portal agroclima (**WWW.AGROCLIMA.CL**): Esta página permite visualizar información meteorológica de diversas estaciones en vivo y tener diferentes herramientas de uso agrícola, además cuenta con alertas dentro de las que se encuentran las alertas por heladas, el cual es generado a partir de un modelo matemático válido únicamente en la zona circundante de la estación correspondiente y entrega un intervalo de tiempo donde pudiese ocurrir el fenómeno de baja temperatura (9:00 a 18:00 hrs), dejando fuera las horas de mayor riesgo.

Es administrado por la Fundación por el Desarrollo Frutícola (FDF) y dentro de las instituciones que participan en el destacan la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), el instituto de investigaciones agropecuarias (INIA), la Universidad de Chile y la Universidad de Valparaíso entre otras empresas e instituciones privadas.

Centro de estudios avanzados en zonas áridas (**WWW.CEAZA.CL**): En este sitio se pueden encontrar pronósticos de temperatura y además cuenta con un sistema de alertas basadas en juicios de un meteorólogo que trabaja en la institución, no consta de un sistema de alarmas para heladas. Es un centro perteneciente a la Universidad de la Serena que trabaja en conjunto con la Universidad Católica del Norte e INIA, con patrocinio del Gobierno Regional de la región de Coquimbo y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT).

Estos sitios nacionales son los que incluyen sistemas de alarmas dentro de la zona de estudio, existen otros sitios relacionados que proporcionan información meteorológica como el de la DMC¹ (**WWW.METEOCHILE.CL**), la Red Meteorológica de Vinos (**WWW.METEOVID.CL**), así como portales agroclimáticos privados como Chileclima (**WWW.CHILECLIMA.CL**).

También se investigaron sitios similares de otros países, concentrando su búsqueda en Estados Unidos que destacan por su capacidad de otorgar alertas de heladas con componentes espaciales (resultado de la alerta en un mapa dinámico), el portal Intellicast (**HTTP://WWW.INTELLICAST.COM/NATIONAL/TEMPERATURE/FROSTFREEZE.ASPX**) tiene a disposición del público Norte Americano alertas sobre los lugares donde ocurrirán los fenómenos de heladas, la Universidad de Georgia mantiene un su estado una red de estaciones y un portal (**HTTP://WWW.GEORGIAWEATHER.NET/**) que actualiza periódicamente proyecciones de temperatura mínima en el estado de Georgia basado en modelos de redes neuronales, existen en el mundo numerosos portales o instituciones que ofrecen los servicios de pronóstico de temperatura mínima.

La propuesta para el desarrollo de este indicador tiene como origen el proyecto; “Desarrollo de una Plataforma de Gestión de Riesgo Agroclimático”. Proyecto postulado a INNOVACHILE (CORFO) cuyo fin es el de potenciar la competitividad del sector agrícola de la región de Coquimbo al implementar una plataforma que sea capaz de emitir señales de alerta ante riesgos agroclimáticos como las heladas, la sequía y las precipitaciones intensas.

Objetivo general

Proponer un indicador que entregue información oportuna sobre la ocurrencia de heladas para la Región de Coquimbo.

Objetivos específicos

- Caracterizar el fenómeno de heladas en la región.
- Identificar las variables meteorológicas críticas que determinan al fenómeno de heladas y desarrollar modelos a partir de estas.
- Desarrollar un indicador de amenaza capaz de realizar un pronóstico de cuando la temperatura vaya a alcanzar los 0°C.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Se utilizó información meteorológica base que permitió caracterizar la zona de estudio, correspondiente a un estudio de zonificación climática, Atlas Bioclimático de Chile (Uribe *et al.*, 2012). Además, se utilizó datos meteorológicos de las estaciones del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) para identificar sectores en los cuales la información presente no sea suficiente. Esto se complementó con estudios e información secundaria que permitió reconocer patrones climáticos en áreas de difícil interpretación.

En la realización de este trabajo, se utilizaron las siguientes herramientas y materiales:

- Datos meteorológicos (horarios, diarios y mensuales) obtenidos del CEAZAMET entre los años 2004 y 2013.
- Cartografía digital con la información del Mapa Bioclimático de Chile (1:250.000).
- Cartografía topográfica digital (NASA) (1:250.000).

Para la caracterización de las heladas en la región de Coquimbo se utilizaron datos meteorológicos del periodo comprendido entre los años 1970 y 2006 (Currihuinca, 2010). Mientras que para la selección de los eventos de heladas y el estudio de los datos meteorológicos que las anteceden, el periodo utilizado fue desde el 2004 al 2013.

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la Región de Coquimbo, ubicada entre los paralelos 29° y 32° sur y los meridianos 70° y 72° oeste. Es una región que se caracteriza geográficamente por la existencia de 3 valles longitudinales; Elqui, Limarí y Choapa. Dentro de estos valles es donde se concentra la mayor actividad agrícola de la región y los principales asentamientos urbanos (Sanchez y Morales, 1990). La Figura 1 muestra los principales cursos de agua de la región, las principales ciudades y el relieve de la región.

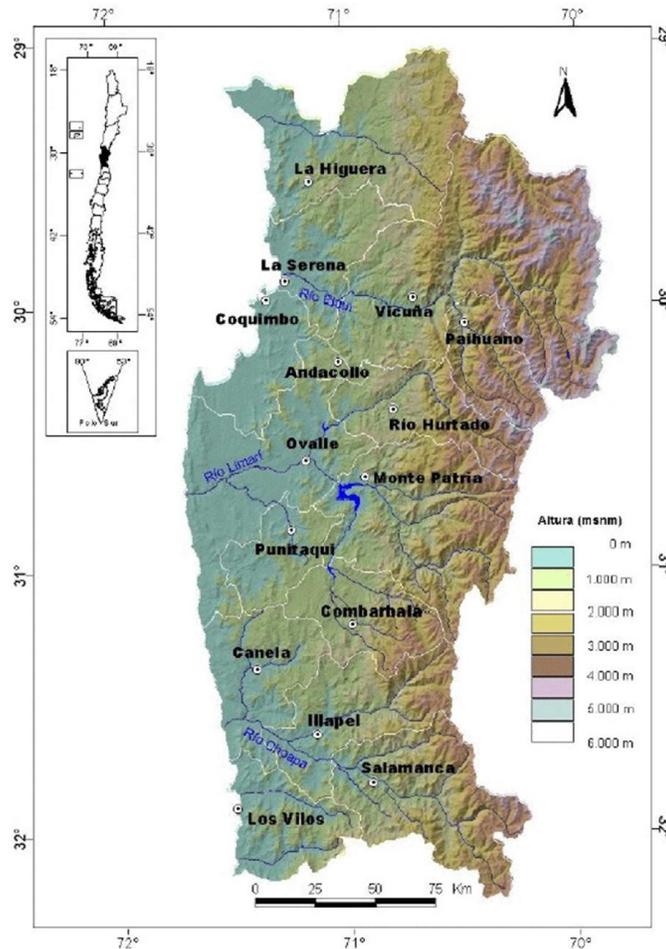


Figura 1. Mapa de la región de Coquimbo, zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1 se aprecian los 3 cuerpos fluviales que dominan la región, los cuales están asociados a los 3 valles donde se concentran las actividades agrícolas y también la población.

Al considerar las características climáticas de la región se destaca que dentro del área de estudio se encuentran 3 tipos de climas;

- Desierto marginal bajo: Este clima se extiende desde el sur de Copiapó hasta los alrededores de Ovalle por la franja central de nuestro país debido a la influencia marítima facilitada por la aparición de valles transversales, las precipitaciones aumentan respecto al clima desértico, llegando a 65mm anuales en la ciudad de Vallenar y con una temperatura media anual de 14,9° C en la misma ciudad (Uribe *et al.*, 2012). En lo que respecta las heladas “Uribe *et al.*, (2012) señala que en algunos lugares las heladas son tan excepcionales que se permite el cultivo invernal”.
- Estepa con nubosidad abundante: Este clima se ubica en la franja costera desde el sur de Coquimbo hasta Zapallar, con una precipitación que varía entre los 150 mm y 200 mm anuales, también se encuentran frecuentemente bancos de niebla y días nublados. Una estación de monitoreo representativa de este clima es la de la Serena con una precipitación media anual de 118 mm y una T° media de 14.9 °C (Uribe *et al.*, 2012). Los fenómenos de heladas en este tipo de clima son muy escasos (especialmente las heladas de origen radiativo) por la influencia marítima y la abundancia de nubes (Moreno y Gibbons, 2007).
- Estepa con gran sequedad atmosférica: Clima muy seco y con cielos de gran luminosidad, se extiende desde Ovalle hasta el norte de Santiago, por los valles interiores sin influencia marítima lo que propicia la sequedad atmosférica (Moreno y Gibbons, 2007). Los Andes es una ciudad dentro de este clima con una precipitación anual de 305 mm y una temperatura media de 15.2 °C. (Uribe *et al.*, 2012).

Método

La figura 2. Muestra la ruta que se seguirá en la metodología.

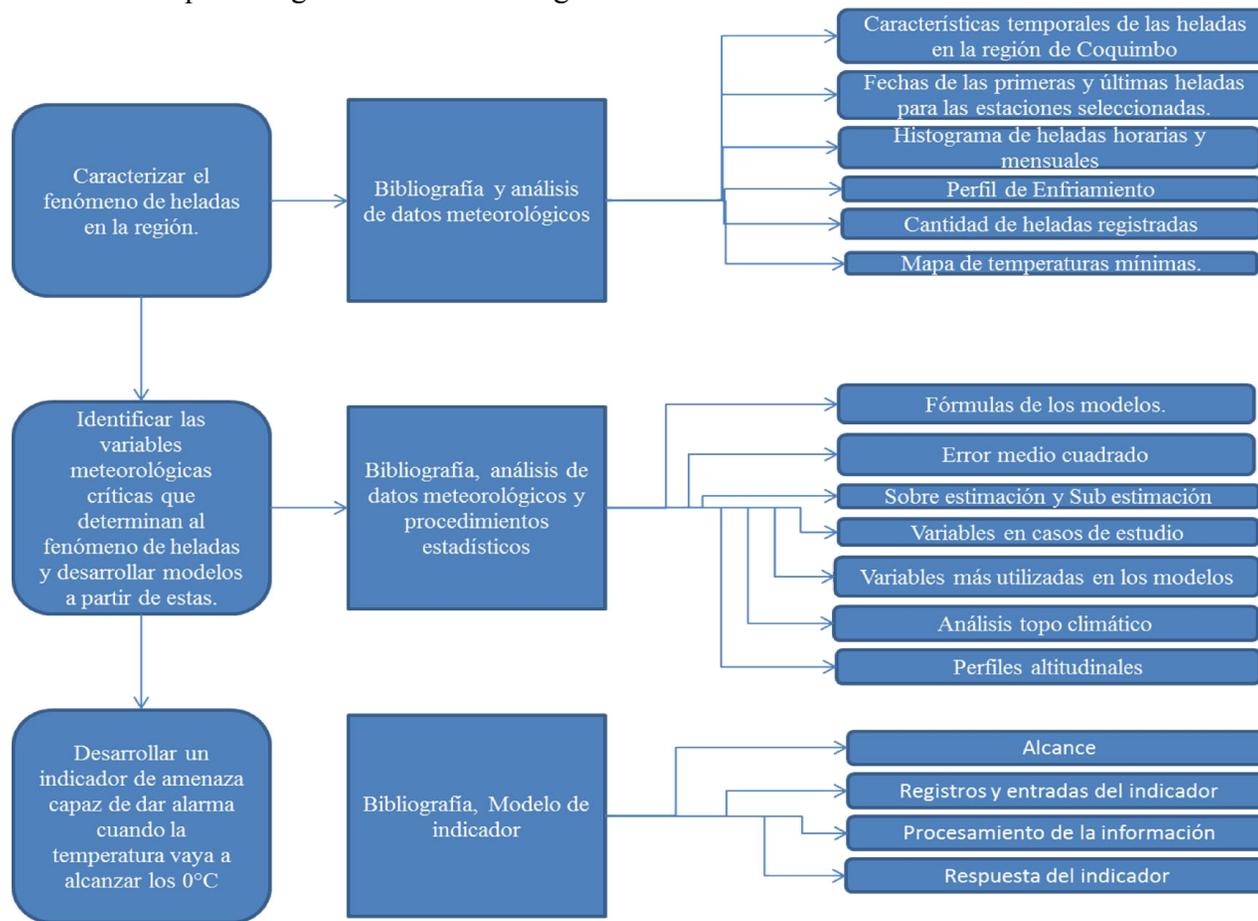


Figura 2. Diagrama de trabajo por objetivo específico, producto final y herramienta utilizada. Fuente: Elaboración propia

Características del fenómeno de heladas en la Región de Coquimbo

Una helada es un evento que se debe describir de forma particular para cada zona geográfica (Naranjo, 1947), debido a las combinaciones entre los diversos factores topográficos y meteorológicos que la gatillan (van Leeuwen, 2010), Para precisar esta definición se procederá a realizar un análisis bibliográfico, que permita una identificación particular del fenómeno en las dimensiones espaciales, temporales y funcionales dentro del área de estudio, referidas al fenómeno radiativo, investigando desde sus fundamentos físicos generales y particulares, también se utilizarán datos meteorológicos que abarcan desde el año 1970 al 2013. Además, se hará un análisis topoclimático de la zona para comprender las relaciones e influencias de los factores topográficos con el comportamiento de las variables meteorológicas (Chevalier *et al.*, 2012). Este análisis considera el estudio del comportamiento de las variables meteorológicas en relación a la posición topográfica de las estaciones seleccionadas.

Características temporales de las heladas en la región de Coquimbo

Para determinar el comportamiento temporal de las heladas en la zona de estudio se utilizó la información obtenida de Currihuinca, 2010. Desde la cual consideramos los siguientes parámetros, todos ellos son calculados utilizando datos de estaciones pertenecientes a la Región de Coquimbo;

- Fecha extrema de la primera helada: Esta fecha sirve para evaluar las heladas temprana que pueden suceder en la región, las cuales son por lo general más dañinas (Martinez *et al.*, 2007), para realizar un promedio anual de esta fecha se suman como días julianos y dividen por el total de los años utilizados (Currihuinca, 2010).
- Fecha extrema de la última helada: Esta fecha sirve para evaluar las heladas tardías susceptibles a suceder en la región, las cuales también son general más dañinas dado el estado fenológico de los cultivos (Martinez *et al.*, 2007) , para realizar un promedio anual de esta fecha se suman como días julianos y dividen por el total de los años utilizados (Currihuinca, 2010).
- Mes con mayor frecuencia de eventos: Esta herramienta sirve para identificar el mes con mayor riesgo de ocurrencia de una helada, se cuenta el número de heladas de

cada mes y se elige el que presenta la mayor cantidad. Para una serie de años se utiliza el mes más frecuente con esta condición (Currihuinca, 2010).

- Número de días anuales sin heladas: Este concepto es el número de días del año donde no se producen heladas. Para el promedio anual se suman la cantidad de días y dividen por el número de años.
- Periodo medio libre de heladas: El periodo libre de heladas se define como la cantidad de días que transcurren desde la última helada de un periodo hasta la primera helada del próximo periodo. Para realizar un promedio anual se suman todos los días pertenecientes al periodo libre de heladas y luego se dividen por la cantidad de años con heladas. (Currihuinca, 2010).

Sin embargo, estos datos fueron calculados a partir de unidades meteorológicas diferentes a las estaciones utilizadas para la creación del modelo, de todos modos aportan información valiosa y se ocupan como referencia para caracterizar el comportamiento temporal de las heladas en la región.

Fechas de las primeras y últimas heladas para las estaciones seleccionadas.

Se definió el intervalo de fechas en donde existe una mayor probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de helada (utilizando datos de las estaciones seleccionadas para el modelo), se calculó la fecha de la primera y de la última helada, utilizando la Ecuación 2 y la Ecuación 3 en la estimación de las fechas de la primera helada (PH) y de la última helada (UH):

$$PH = 105 - \arcsen [1 - [(qm-5,5) / (0,5 * (qm-qn))]]$$

Ecuación 2. Calculo de la fecha para la primera heladas.

$$UH = 285 + \arcsen [1 - [(qm-5,5) / (0,5 * (qm-qn))]]$$

Ecuación 3. Calculo de la fecha para la última helada.

(Laboratorio Agroclimatología, Dpto. de Ing. y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas.
Universidad de Chile, 1991)

Donde,

qm: Temperatura Media Mínima Mensual (°C) del mes más cálido.

qn: Temperatura Media Mínima Mensual (°C) del mes más frío.

Se considera el mes de Julio como el mes más frío y el mes de Enero como el más cálido (Uribe *et al.*, 2012). Estas fechas se calcularan para cada estación en particular y se utilizaran la disponibilidad de los datos según estación para realizar un promedio de las temperaturas mínimas para enero y Julio.

Histograma de heladas horarias y mensuales.

Con el objetivo de determinar las frecuencias de las heladas en las horas del día se realizó un histograma de frecuencias de heladas desde las 00:00 hrs hasta las 23:00 hrs. Este histograma determinó las 3 horas con mayor frecuencia las cuales se utilizaron para el modelo de regresión, en este histograma se utilizaron todas las heladas que ocurriesen en una hora determinada considerando la totalidad de las estaciones. Adicionalmente se realizó un histograma de frecuencias de heladas mensuales para identificar los meses con mayor cantidad de eventos de heladas.

Perfil de Enfriamiento

Con el fin de establecer la dinámica temporal del enfriamiento del aire, se realizó un perfil térmico, el cual consiste en graficar la temperatura del aire promedio de cada hora, y la tasa de cambio con el objetivo de poder analizar la variación de temperatura en un día y especialmente en las hora donde el índice tiene incidencia para realizar la predicción. Este perfil se enmarco en 3 escenarios distintos, considerando: la totalidad de los datos de las 10 estaciones; el promedio de las temperaturas de todas estas para cada hora; y, la ubicación de estaciones singulares en la región (diferentes valles transversales de la región y tener una distancia al mar similar). En este sentido se consideró a: Estación Gabriela Mistral, Estación Illapel y Estación Camarico como representativas de las 3 cuencas existentes.

Número de heladas registradas

Con el objetivo de contrastar las diferencias en la cantidad de heladas que ocurren en las diferentes estaciones (para este efecto se consideró que se produce una helada cuando la T° sea igual o menor a 0°C al menos un instante en una hora), se elaboró una tabla que puso en evidencia esta variación, tomando en cuenta todos los registros de heladas que se tengan de las estaciones por separado y el promedio anual de estas, además se calculó la desviación estándar de las heladas entre todas las estaciones y su promedio, con el fin evidenciar las diferencias en la frecuencia de este fenómeno entre las estaciones, y estudiar las relaciones topoclimáticas con estas estaciones una vez establecidas aquellas más propensas al fenómeno. Es importante aclarar que son horas y no días los que se expresan como heladas, se eligió ese formato de presentación considerando que el modelo tiene como objetivo pronosticar heladas para horas en específico y no días.

Mapa de temperaturas mínimas

La distribución espacial de las temperaturas mínimas se presentará con un mapa de temperatura mínima de la región, obtenido de Uribe *et al.* 2012, luego se elaboró un análisis cruzado de la información con los resultados de los modelos y los análisis topoclimáticos correspondientes.

Identificación de variables meteorológicas críticas y elaboración del modelo

Para un correcto desarrollo del modelo es necesario la selección de las variables según al incidencia de estas en la génesis de una helada, ya que un fenómeno de esta naturaleza es influenciado por distintos factores y en distinta medida según sea su condición (Casas, 2011).

Modelo lineal y selección de variables “Stepwise”

Con el análisis de los datos históricos de los registros de heladas y los factores meteorológicos de los días anteriores a los eventos de heladas, se hizo un análisis de regresión múltiple para identificar las variables que tienen mayor incidencia en la génesis de una helada. Se aplicó el procedimiento estadístico “Stepwise” el cual selecciono los factores que expliquen el fenómeno de mejor manera, considerando la precisión del modelo y la cantidad de variables a considerar (menos variables constituyen un mejor modelo de regresión, ya sea por su simpleza así como por la economía en tiempo y dinero al conseguir los datos). La herramienta “Stepwise” es una metodología que mezcla los algoritmos de introducción progresiva de variables y eliminación progresiva de variables, de esta manera prueba diferentes combinaciones de estos factores con el objetivo de encontrar el modelo más preciso con la menor cantidad de variables (Faraway, 2002). Con el objetivo de que las regresiones realizadas puedan ser utilizadas ampliamente, se utilizaron todos los registros existentes (desde el año 2004 al 2013) para las 3 horas seleccionadas donde más se producen los fenómenos, pero para la construcción de las regresiones se usaron todos los días disponibles, ocurriesen o no heladas en las horas seleccionadas. Estos datos se dividirán en un 70% para la construcción de los modelos de regresión y un 30% para su prueba.

Debido al requerimiento puntual de los datos para la investigación, no es necesario realizar un análisis de consistencia para los datos ya que la metodología no considera análisis climático, si no meteorológico con un rango de tiempo de no más de 12 horas. Los análisis de consistencia de datos tiene como objetivo estudiar los cambios en la medición de los datos por la renovación tecnológica o cambios naturales que los influyan, así como también indicar si la falta de datos afectará a un estudio de larga data y completar los registros ausentes (Chereque, 1989), ambas situaciones no son necesarias dentro del trabajo presente

Los eventos de heladas se agruparon en; grupo para la creación del modelo de regresión y grupo de prueba. Los datos del primer grupo fueron los utilizados para la creación de la regresión y esto se introdujeron dentro de la herramienta “Stepwise”. El segundo grupo se utilizó para evaluar la precisión del modelo de regresión, considerando las variables de los días anteriores a estas heladas y usándolas dentro del modelo de regresión se midió las veces que este modelo indico la ocurrencia de la helada, sabiendo de ante mano que esos días ocurrieron fenómenos de esta naturaleza.

El ajuste del modelo y el procedimiento “stepwise” se realizaron utilizando el software estadístico R.

Se crearon predicciones para las 3 horas del día donde se agrupan la mayor cantidad de eventos de heladas según los registros históricos. Para cada hora se elaboró un modelo diferente desde 12 horas antes hasta 3 horas antes de cada hora seleccionada. Dentro de la aplicación de esta metodología el principal aspecto que se analizo fue la relación que tiene cada variable con la temperatura mínima y el nivel en que cada una de estas variables afecta el resultado de la helada, es por este motivo que se realizaron modelos de regresión para diferentes rangos de temperaturas, estos son los siguientes; cuando la temperatura mínima a la hora estudiado es inferior o igual a 0 grados, cuando la temperatura es igual o inferior a 5 grados y considerando todas las temperaturas mínimas de la hora objetivo.

El modelo matemático formulado por la regresión será aplicado al modelo de indicador.

Dentro de los resultados esperados para esta metodología se consideraron las fórmulas de los modelos resultantes, el error medio cuadrado y el porcentaje de sobre o sub estimación.

Fórmulas de los modelos

El resultado del “stepwise” es en sí una fórmula de predicción de la variable dependiente, considerando el hecho de que se realizaron 10 modelos diferentes para cada hora seleccionada y bajo 3 escenarios diferentes (bajo 0° C, bajo 5° C y todos los datos) se obtuvo una cantidad de 90 fórmulas de regresión, las cuales son especialmente importantes para poder realizar el análisis correspondientes a las variables más utilizadas o las más importantes el cual se desarrolló en su correspondiente capítulo.

Error medio cuadrado

En la creación de un modelo de predicción la manera más utilizada de medir el error presente entre la predicción realizada y los datos observados es la utilización del error medio cuadrado (Ross, 2005), la cual se aplicó en cada modelo creado según la Ecuación 4.

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{n}}$$

Ecuación 4. Ecuación del cálculo del error medio cuadrado.

Donde,

EMC: Error medio cuadrado.

x' : El valor estimado.

x : El valor registrado por las estaciones meteorológicas.

n : El tamaño de la muestra.

Este método de cálculo del error de los modelos permitió discriminar los modelos según su asertividad y por la forma como se calcula elimina la compensación de los errores (diferencias negativas se compensan con diferencias positivas).

Sobre estimación y Sub estimación

Uno de los problemas asociados a la predicción de las heladas es la determinación de que el modelo tienda a sub estimar los resultados o por el contrario a sobre estimarlos, esto afecta particularmente a las heladas ya que se trata de una predicción sujeta a una temperatura umbral (0° C) por lo que una sobre estimación constante de las temperaturas provocaría una recurrente falla en la predicción de las heladas no cumpliendo el objetivo de dar alerta cuando fuese a ocurrir una helada, ahora bien si por otro lado la predicción tendiese a la subestimación de las temperaturas ocurrirían más alertas de heladas de las que realmente sucedieran, lo que haría tendría un efecto negativo sobre la veracidad del modelo y el indicador ya que causaría alertas injustificadas sobre el público objetivo del indicador.

Para realizar el cálculo de la sobre o sub estimación se restaron los datos de prueba y los datos modelados, si el resultado es negativo se dedujo que existió una sobre estimación ya que la temperatura calculada será mayor a la temperatura real y por el caso contrario si el resultado fuese positivo el resultado sería una sub estimación ya que la temperatura modelada sería inferior a la registrada.

Variables más utilizadas en los modelos

Una vez listas las fórmulas de todos los modelos, se realizó una tabla que puso en evidencia las variables más utilizadas dentro de estos modelos y las menos utilizadas, las cuales fueron seleccionadas con el procedimiento “Stepwise” anteriormente. Con esta tabla se pudo elaborar la comparación de las diferentes variables para poder determinar aquellas que tienen mayor incidencia dentro del proceso que desencadena un fenómeno de helada. Los resultados se expresaron tanto en los valores absolutos de las diferentes variables como en los porcentajes dentro del total de fórmulas obtenidas.

El principal objetivo que tiene como trasfondo la determinación de la variable más relacionada es el de poder en un futuro tener claro cuáles de estas son necesarias medir y conocer su estado en el caso de proponer sistemas de prevención de heladas.

Análisis topo climático

Para poder primero analizar el comportamiento de la temperatura respecto a los accidentes geográficos en una escala pequeña, se investigaron antecedentes que permitan conocer este comportamiento, es por esto que primero se produjo una búsqueda bibliográfica que permitió identificar las características de la topografía que pueden producir variaciones en la magnitud de las temperaturas mínimas, estas diferencias pueden provocar heladas sectorizadas y es necesario conocerlas para poder pronosticar heladas con mayor certeza.

De forma complementaria se realizó una tabla con antecedentes particulares de cada estación con el fin de comprender de mejor manera su posición y relación con factores que

determinan las temperaturas, los cuales en este caso fueron; Altura (metros sobre nivel del mar), el clima en cual se encuentra cada estación y la distancia al mar (m), adicionalmente se incluirá el periodo libre de heladas para usarlo como marco de referencia con los otros datos.

Si bien por la escala en la cual fue concebido el indicador, los factores topoclimáticos no son aplicables, se realiza este análisis con el objetivo de determinar los antecedentes topoclimáticos para futuras referencias y estudios que logren mejorar la precisión de un sistema de heladas a escalas más pequeñas.

Perfiles altitudinales

Para el análisis topoclimático se realizaron perfiles altitudinales de cada una de las estaciones, estos perfiles consisten en un gráfico donde se expresa la distancia del punto elegido hasta el mar y la variación del relieve en esa distancia considerando una línea recta desde el punto indicado al mar (u otro punto deseado). Esta herramienta es útil al poner en perspectiva la influencia del mar sobre las temperaturas y la posición relativa de las estaciones con los elementos topográficos circundantes.

Desarrollo del indicador de amenaza

Desarrollo de un indicador para pronosticar la incidencia de un fenómeno de heladas.

Una vez seleccionadas las variables y la fórmula del indicador mediante el método “Stepwise”, se aplicara el modelo del indicador de amenaza y se identificarán las características del indicador según las siguientes categorías:

- **Objetivo:** Se definió para el indicador un objetivo y uso claro dentro de su alcance y su resultado será interpretable dentro de los criterios propuestos y no tendrá validez fuera de ellos.
- **Criterios:** Se estipularon los criterios para la interpretación de los resultados del indicador, según el grado de amenaza que cada uno de estos representan.
- **Formula:** La fórmula se obtiene del objetivo específico N°2 y en la creación del indicador se explica cada variable, el uso y origen de la fórmula matemática.
- **Registro:** Se identificó la información necesaria para el indicador, las estaciones y la hora del día adecuada para su funcionamiento.

Alcance del indicador

El alcance se definió tomando en cuenta tanto el origen geográfico de los datos, la escala de trabajo utilizada, la frecuencia de los datos y la hora objetivo. La conjugación de estos factores determinó el alcance geográfico y horario del indicador. También se consideró los factores intrínsecos con que se construyó el indicador para determinar si es capaz de otorgar información de la amenaza de helada, de la vulnerabilidad del cultivo o de ambas.

Registros y entradas del indicador

La frecuencia de los datos se definió al establecer los parámetros de los modelos. Por otro lado los datos necesarios según las variables seleccionadas se definirán unas veces realizado los modelos, considerando el origen de los datos y la estructura del indicador también se identificó la mejor fuente de información para la aplicación de este.

Procesamiento de la información

Cuando se disponga de los resultados de los modelos y se allá realizado el análisis de la precisión de estos, se procedió a generar un método para la clasificación de la amenaza según el resultado de los modelos y teniendo en especial consideración el error asociado a cada modelo. Si bien a priori no se tiene un modelo a seguir para el proceso de la información, si se considera que la relación de la temperatura pronosticada y el EMC correspondiente al modelo y la hora en cuestión son los dos factores que pueden llegar a determinar el nivel de amenaza existente.

Respuesta del indicador

Se estableció que luego del procesamiento de la información, arrojará alertas relacionadas a un nivel de amenaza determinado por el mismo procesamiento de la información, y estarán en directa relación con la probabilidad de que ocurra un fenómeno de heladas.

Resultados y discusión

Caracterización del fenómeno de heladas en la Cuarta región

Características temporales de las heladas en la región de Coquimbo

Como se observa en el Cuadro 1 existe una marcada estacionalidad respecto a la ocurrencia de los eventos, siendo el mes de Julio donde ocurren de formas más frecuente, la distribución anual de las heladas ocurre en promedio entre el 4 de Mayo al 20 de Agosto, acorde a la época invernal de la región (Currihuinca, 2010). El número de días sin heladas tiene un promedio entre todas las estaciones de 358.03 días, lo que significa una amplia mayoría de los días del año sin que ocurran estos eventos, mientras que con un promedio de 335.95 días, el periodo libre de heladas demuestran que el periodo sin riesgo de estas es mucho mayor al periodo con riesgo.

Aunque la frecuencia del fenómeno en la región es baja y existe una marcada estacionalidad, ocurren eventos de heladas tardías las cuales son especialmente dañinos para los cultivos (Martínez *et al*, 2007).

Cuadro 1. Características Temporales de las Heladas en distintas estaciones de monitoreo en la región de Coquimbo. *Estaciones ubicadas en altura sobre los valles, influenciando un registro menor de heladas. Fuente: Currihuinca, 2010.

Estación	Fecha promedio primera helada	Fecha promedio última helada	Mes con mayor frecuencia de heladas	Número de días sin heladas	Periodo medio libre de heladas
Vickuña (INIA)	13/06	30/07	Julio	S/I	345.2
Pan de Azucar (INIA)	13/07	9/08	Julio	362.5	412.8
Ovalle	31/07	31/07	Julio	S/I	364
Punitaqui	12/07	23/07	Julio	361.2	S/I
Combarbala (Sendos)	19/05	8/07	Julio	358.3	311.5
Combarbala (agro)	10/07	25/07	Julio	362	S/I
Illapel	19/06	2/07	Julio	362.6	S/I
Chuchuña	4/05	20/08	Julio	350.3	341.1
Salamanca (Agro)	31/05	11/08	Julio	357.6	287.7
Salamanca (CCT)	29/05	17/08	Julio	349.8	289.4

Fechas de las primeras y últimas heladas para las estaciones seleccionadas

En el Cuadro 2 se aprecia la marcada estacionalidad de las temperaturas bajo cero medidas en las estaciones utilizadas para la creación de los modelos, estas temperaturas se concentran en los meses invernales y confirman la variabilidad de los periodos con riesgo de heladas entre las estaciones de la misma región y en algunos casos las mismas cuencas. Esta información ayuda a confirmar el análisis realizado con los datos de Currihuinca, 2010.

Cuadro 2. Fechas de la Primera y última heladas de las estaciones seleccionadas para el modelo. Fuente: Elaboración Propia.

Estación	Primera Helada	Última Helada
Algarrobo Bajo	30 de Mayo	28 de Agosto
Camarico	4 de Julio	23 de Julio
El Palqui	13 de Junio	14 de Agosto
Gabriela Mistral	3 de Junio	24 de Agosto
Huintil	6 de Abril	21 de Octubre
Illapel	28 de Abril	29 de Septiembre
Pan de Azúcar	12 de Junio	15 de Agosto
Vickuña	11 de Mayo	16 de Septiembre

Es pertinente agregar que dada la naturaleza de este índice pueden ocurrir heladas en los periodos determinados como “libres de heladas” y que el resultado que este arroja es una estimación basada en los promedios de las temperaturas mínimas y no en datos empíricos de eventos de heladas.

También hay que tener en consideración la representatividad de la red de estaciones que en muchas ocasiones pueden no ser las más óptimas, sobre todo considerando una geografía tan accidentada como la de nuestro país. Para aumentar la representatividad de la red de estaciones es necesaria una densificación de centros de monitoreo así como un estudio más detallado de las características topo y micro climáticas (Castillo y Castellvi, 2001) que rodean a las estaciones para poder distinguir la influencia local de una de mayor escala.

Histograma horario y mensual de las Heladas

Cuadro 3 y la Figura 1 muestran la frecuencia horaria y acumulada de temperaturas iguales o bajo los cero grados.

Cuadro 3. Frecuencia horaria y acumulada de las heladas. Fuente: Elaboración propia. (Continúa en la página siguiente).

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>% acumulado</i>
17	5	0	0
18	6	0.34	0.62
19	7	0.39	1.01
20	7	0.39	1.41
21	13	0.73	2.14
22	21	1.18	3.33
23	30	1.69	5.02
0	43	2.42	7.44
1	76	4.28	11.72
2	101	5.69	17.42
3	129	7.27	24.69
4	172	9.70	34.39
5	222	12.51%	46.90%
6	275	15.50%	62.40%
7	314	17.70%	80.10%

Cuadro 3. Frecuencia horaria y acumulada de las heladas. Fuente: Elaboración propia. (Viene de la página anterior).

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>% acumulado</i>
10	11	0.62%	98.08%
11	6	0.34%	98.42%
12	7	0.39%	98.82%
13	5	0.28%	99.10%
14	5	0.28%	99.38%
15	5	0.28%	99.66%
16	6	0.34%	100.00%

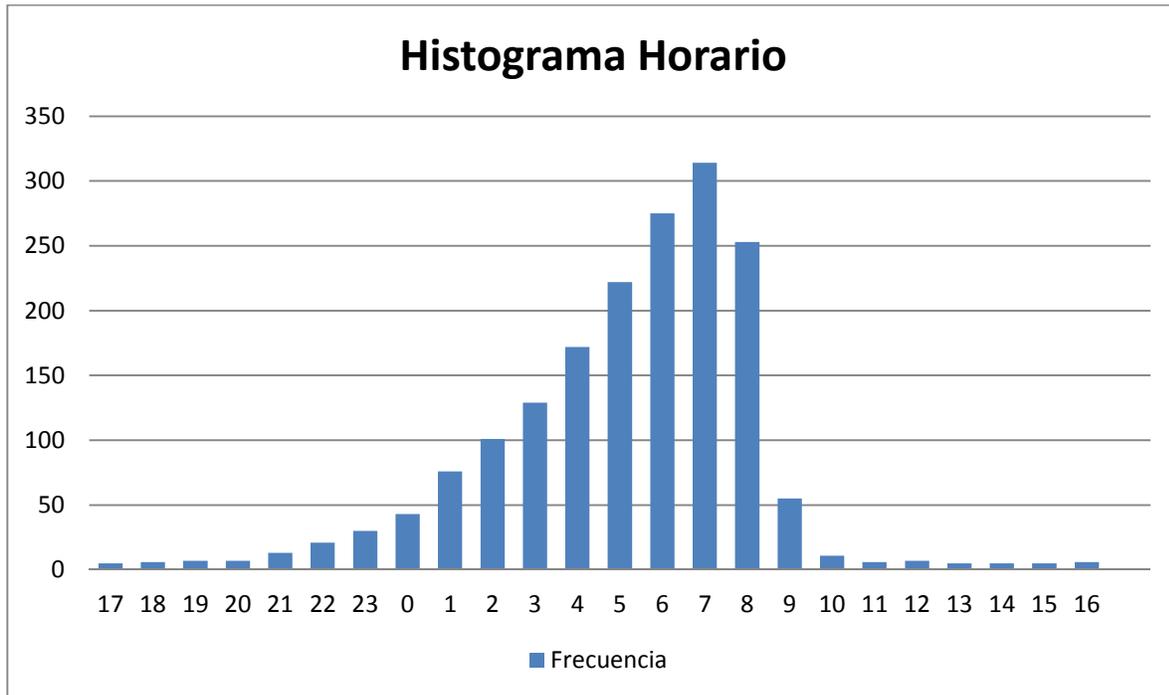


Figura 3. Frecuencia horaria de las heladas Fuente: Elaboración propia.

Este histograma permite distinguir como los fenómenos de heladas se distribuyen dentro de las 24 horas del día, esta información es necesaria para determinar las horas donde el fenómeno es más recurrente y de esta manera construir un indicador que se centre en estas.

Las 3 horas de mayor amenaza del día donde se producen la mayor cantidad de heladas son las 6, 7 y 8 de la mañana concentrando un 47.6% de las temperaturas bajo los 0° C, estas

corresponden a las horas seleccionadas para la creación de los modelos. Además estos datos confirman que las temperaturas mínimas se concentran en las horas de la madrugada entre las 0 horas y las 8 de la mañana se concentra el 89.35% de las heladas, condición dada preferentemente por la ausencia de energía proveniente del sol (Castillo y Castellvi, 2001).

La distribución temporal durante los meses del año se ilustra en el Cuadro 4 y la Figura 4.

Cuadro 4. Distribución de la frecuencia de heladas mensualmente. Fuente: Elaboración propia.

<i>Meses</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje (%)</i>	<i>% acumulado</i>
Enero	0	0	0
Febrero	0	0	0
Marzo	0	0	0
Abril	12	1	1
Mayo	73	4	5
Junio	299	17	22
Julio	918	52	73
Agosto	291	17	90
Septiembre	53	3	93
Octubre	13	1	94
Noviembre	114	6	100
Diciembre	0	0	100

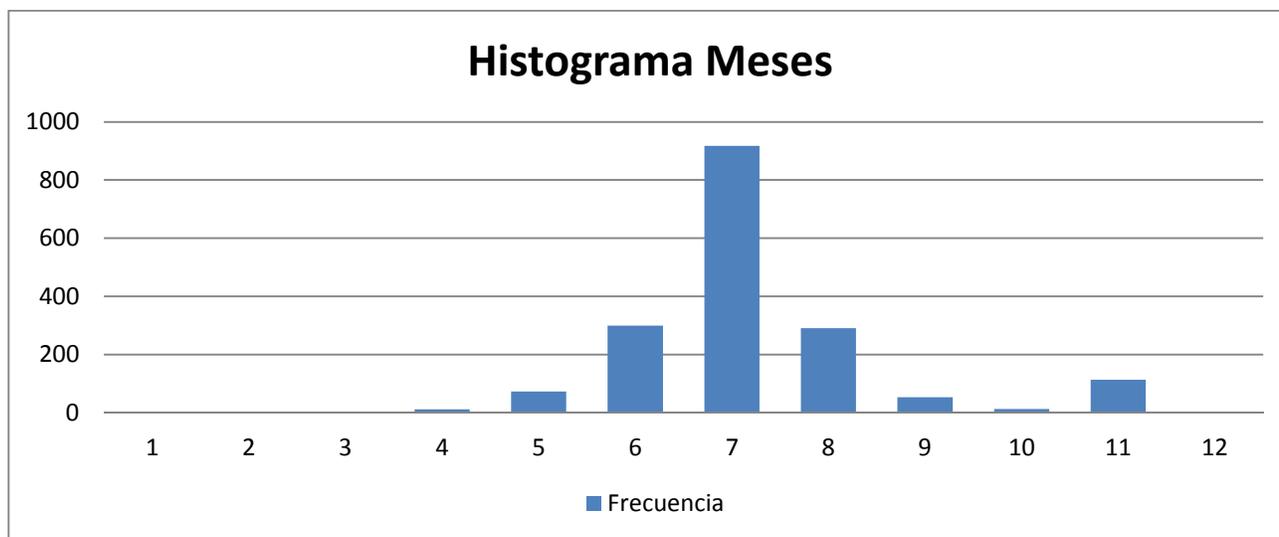


Figura 4. Histograma de frecuencia de heladas mensuales. Fuente: Elaboración propia.

La distribución mensual de las heladas responde al patrón del clima que se encuentra en el área de estudio con inviernos muy marcados donde se concentran las bajas temperaturas las cuales se ausentan en los meses estivales, resalta el mes de julio el que concentra el 51.78% del total de los eventos estudiados, calzando en la época donde la región recibe una menor cantidad de radiación solar y por ende temperaturas más bajas (Gonzales e Hidalgo, 2009).

Al igual que el periodo libre de heladas esta información es útil para determinar los periodos con mayor riesgo de ocurrencia de heladas, pero también sirven para estimar cuando las heladas pueden ser más dañinas (heladas tempranas o tardías) y ajustar los ciclos agrícolas.

Perfiles de enfriamiento general y de 3 estaciones seleccionadas.

Para lograr identificar la variación de la Temperatura mínima con respecto al tiempo (en horas) en un día se elaboraron las figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

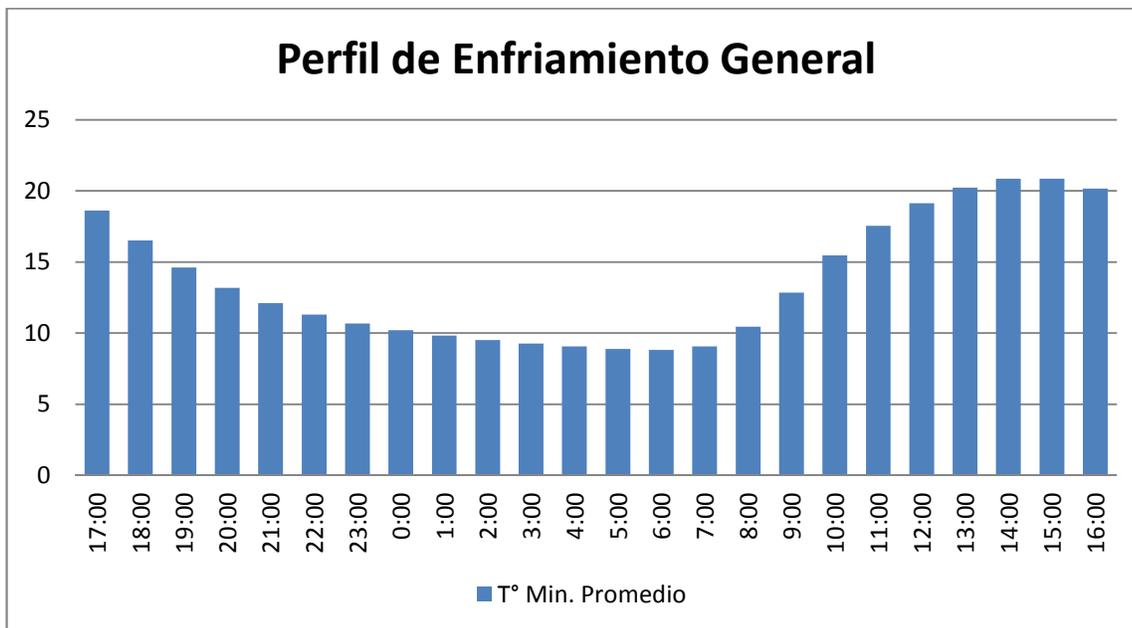


Figura 5. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de las diez estaciones seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

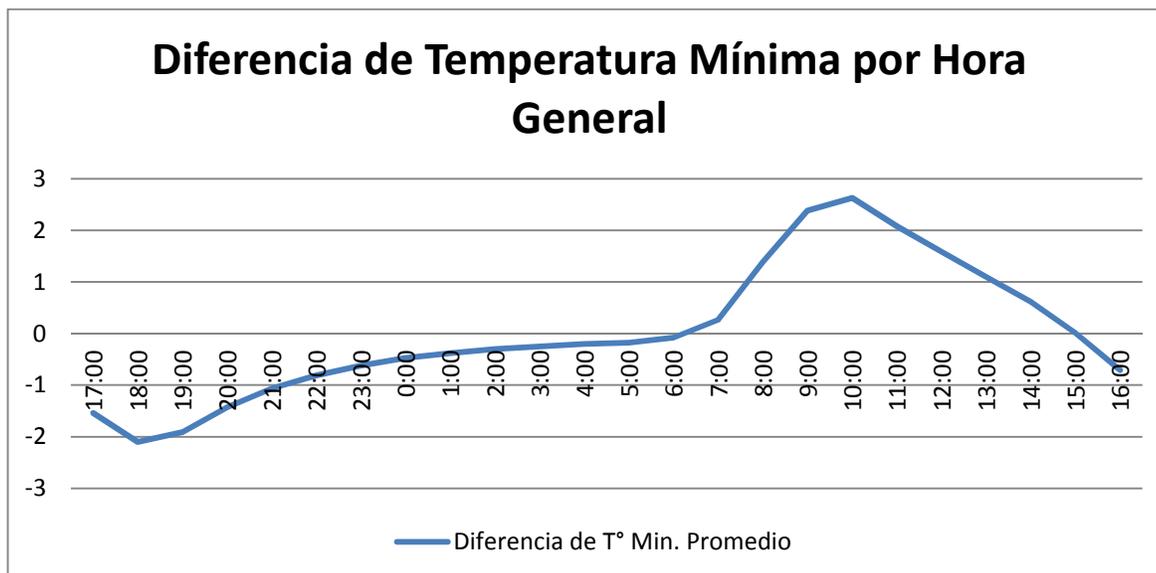


Figura 6. Tasa de cambio de la temperatura promedio mínima horaria en el escenario general. Fuente: Elaboración propia.

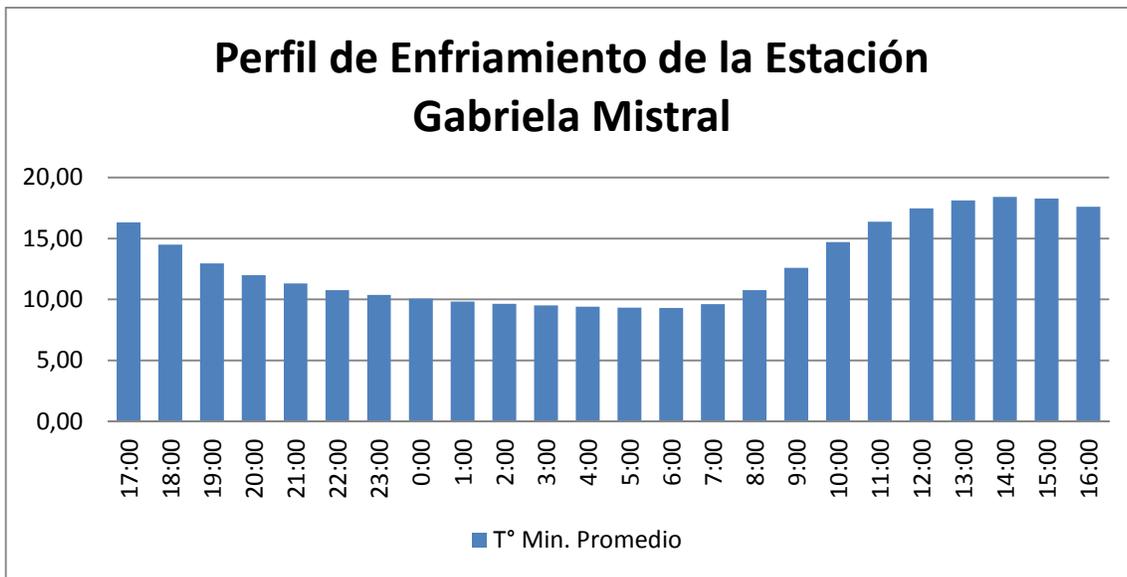


Figura 7. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración propia.

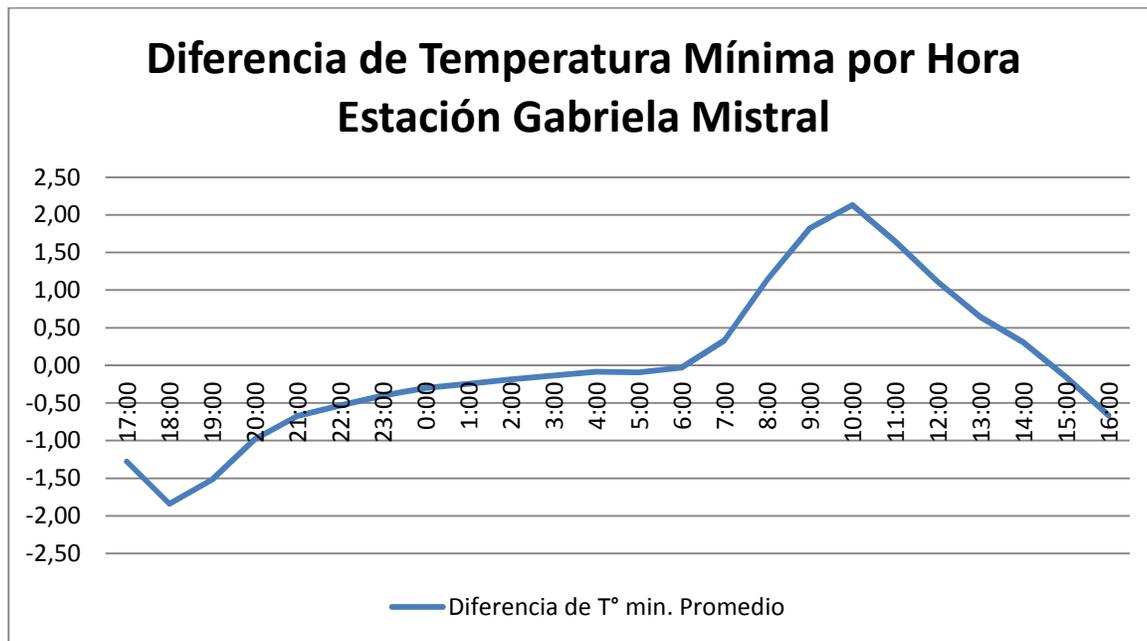


Figura 8. Tasa de cambio de la temperatura promedio mínima horaria en la estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración propia.

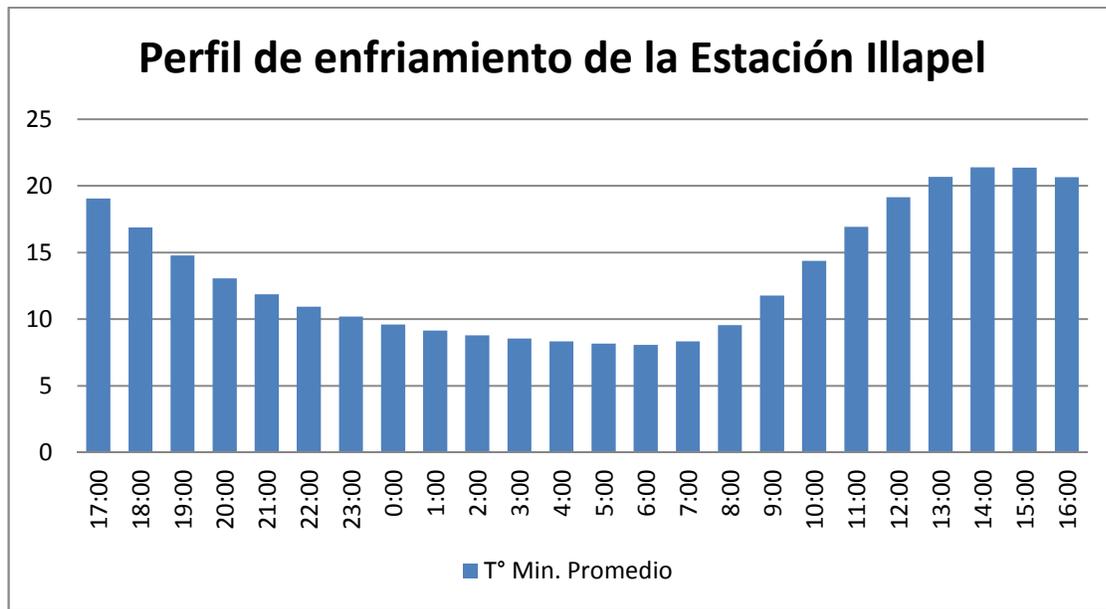


Figura 9. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Illapel. Fuente: Elaboración propia.

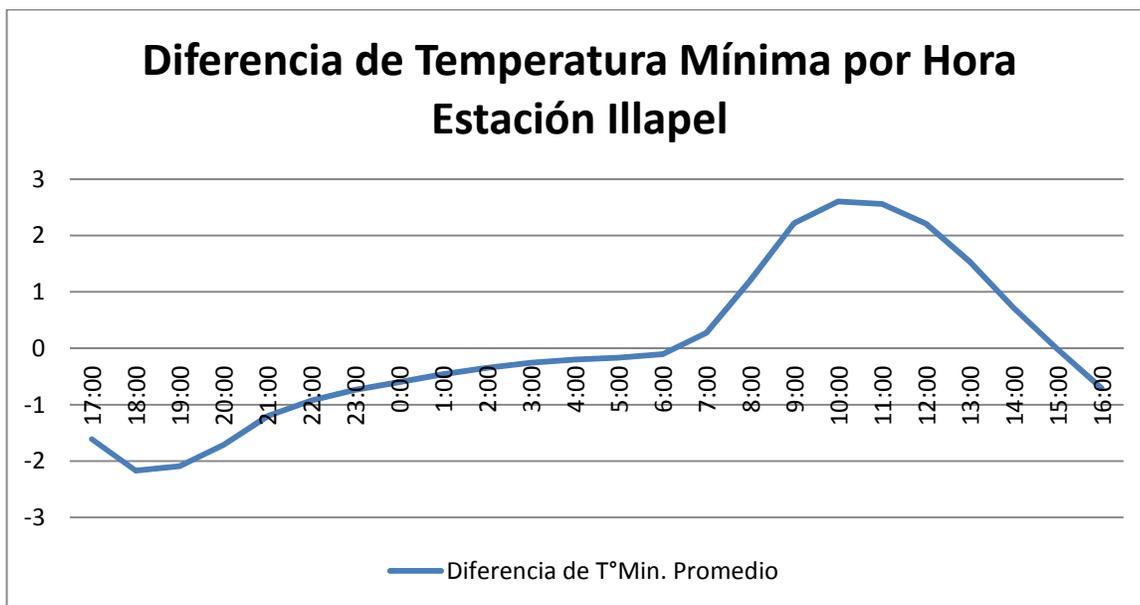


Figura 10. Tasa de cambio de la temperatura promedio mínima horaria en la estación Illapel. Fuente: Elaboración propia.

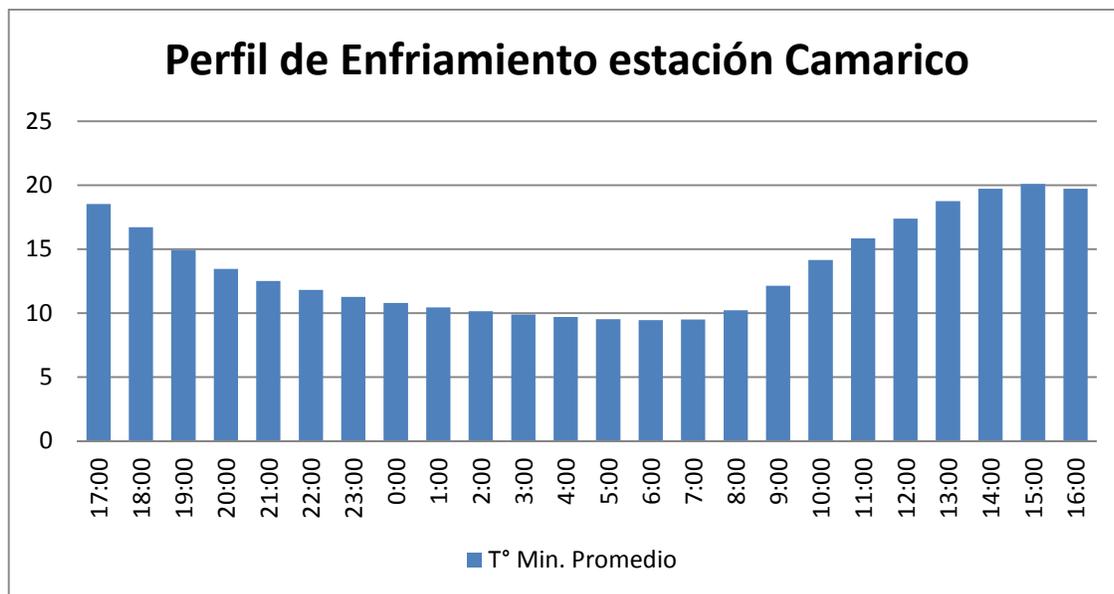


Figura 11. Perfil de enfriamiento diario, considerando el promedio de las temperaturas horarias mínimas de la estación Camarico. Fuente: Elaboración propia.

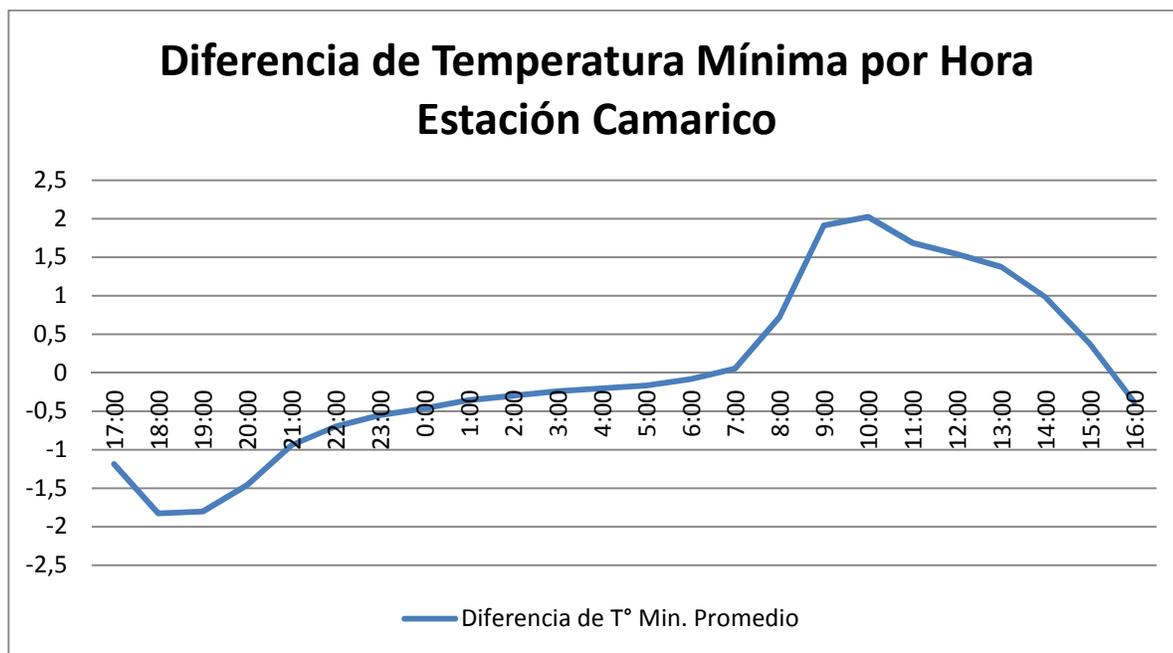


Figura 12. Tasa de cambio de la temperatura promedio mínima horaria en la estación Gabriela Camarico. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia la similitud de las curvas entre los cuatro casos donde se presenta la temperatura, con una pronunciada pendiente negativa entre las 17:00 y 22:00 hrs, seguida de una disminución la pendiente debido al estancamiento de la variación de la temperatura, como se observa en los correspondientes graficos de las tasas de cambio. Esto se produce

porque luego de esas horas ya ha sido emitida la mayoría de la radiación almacenada en el día por parte del suelo y la parte baja de la atmosfera (Castillo & Castellvi, 2001) lo que significa una menor pérdida de energía del sistema. Se aprecia en los gráficos que las horas previas al proceso de aumento de la temperatura son las horas más frías y también donde el sistema es térmicamente más estable, esto tiene congruencia con el fenómeno de radiación, es decir que las horas más frías son aquellas donde se ha irradiado energía por más tiempo sin tener una fuente que le proporcione energía al sistema (horas antes de la salida del sol).

Los gráficos presentados tienen comportamientos similares en cuanto a la variación de las temperaturas, pero ocurren diferencias en la magnitud de la temperatura promedio en horas particulares, la temperatura más alta alcanzada en el caso general ocurre entre las 13:00 y las 15:00 hrs., con temperaturas que sobrepasan los 20°C , situación que se repite en la estación Illapel, sin embargo en la estaciones Gabriela Mistral la temperatura mínima promedio más alta no logra alcanzar los 20°C y en la estación Camarico apenas logra esta temperatura en el momento de mayor temperatura, de todos modos se puede apreciar que las horas de mayor temperatura son las mismas que en el caso general y en los otros 3 casos.

En el otro extremo cuando se comparan las temperaturas más bajas, también se observan similitudes en cuanto a las variaciones en la magnitud de las temperaturas entre los diferentes escenarios; en el caso general las temperaturas mínimas más bajas alcanzan los 8.8° , el rango de horas donde se registran los valores más bajos son entre las 04:00 y las 07:00 hrs. En el caso de la Estación Gabriela mistral el valor mínimo alcanzado por las temperaturas corresponde a 9.29° , similar a la alcanzada por la estación camarico (9.4°C), mientras que en la estación Illapel se observa un valor más bajo (8.07°C).

Dentro de las diferencias más destacables es la amplitud térmica presente, la estación Illapel es la que tiene la mayor temperatura, pero también es la que posee la temperatura mínima más baja, considerando la totalidad de los datos se puede deducir que aquellas estaciones que posean una amplitud térmica mayor son más propensas a verse afectadas por un fenómeno de heladas, debido a la ausencia de elementos reguladores de la temperatura (cuerpos de agua o aislamiento del entorno) lo que hace más propensas a estas estaciones a sufrir un fenómeno de heladas (Castillo y Tunarosa, 1969).

Otro dato importante que se desprende de la interpretación de los gráficos es la hora donde se puede activar el indicador, se asume que se debe tener tiempo en el caso de que se pronosticase una helada para poder poner en marcha los sistemas preventivos, también es importante considerar el nivel de certeza que presenta el modelo a cierta hora y la probabilidad de que ese pronóstico pudiese cambiar, tomando en cuenta eso se consideró que entre las 00:00 hrs. y las 03:00 hrs. Considerando lo expuesto en los gráficos (tasa de cambio cercanas a 0) estas son las horas donde se puede otorgar un pronóstico en el escenario más estable y útil tomando en cuenta el tiempo para poner en marcha los planes preventivos. Esto sin considerar la precisión del indicador la cual será analizada en capítulos posteriores.

Número de heladas registradas

El número de horas bajo 0° C reflejadas en el Cuadro 4 demuestra la variabilidad de este evento incluso dentro de regiones geográficas acotadas como la Región de Coquimbo o aún regiones de dimensiones menores, como en el caso de estaciones ubicadas en la misma cuenca. Este es el reflejo de como las características topográficas influyen directamente en las dinámicas meteorológicas de menor escala (Castillo & Castellvi, 2001; Tunarosa, 1969).

Tres de la totalidad de las estaciones están por sobre el promedio de heladas (por año), las 7 restantes están por debajo de la media aritmética, esta tendencia demuestra la preponderancia de los valores extremos en el cálculo de la media. El valor de la desviación estándar demuestra la variabilidad influenciada por los extremos, considerando este parámetro 9 de las diez estaciones se encuentran dentro del promedio más o menos una desviación estándar.

Además resalta el hecho de que las estaciones que presentan mayor cantidad de heladas son aquellas relacionadas con la cuenca del río Choapa, sin embargo el análisis de esta situación escapa al alcance de la investigación.

La cantidad de heladas por estación se puede relacionar con varios factores como la altitud, distancia al mar, aislamiento de las estaciones y posición respecto a los accidentes geográficos circundantes (Tunarosa, 1969), se hace un análisis más completo de estas relaciones más adelante en el ítem de análisis topoclimático.

Cuadro 5. Cantidad de horas bajo cero registradas por las estaciones (cada unidad representa una hora donde la temperatura mínima fue igual o inferior a los 0 °C). Fuente: Elaboración propia.

Estación	Número de Horas bajo 0 °C	Años considerados	Heladas por año
El Palqui	1.0	2.0	0.5
Algarrobo Bajo	34.0	3.0	11.3
Gabriela Mistral	62.0	9.0	6.9
Llanos de Huanta	118.0	3.0	39.3
Pan de Azúcar	120.0	9.0	13.3
Pisco Elqui	124.0	9.0	13.8
Camarico	142.0	3.0	47.3
Vicuña (Inia)	162.0	9.0	18.0
Illapel	221.0	4.0	55.3
Huintil	660.0	3.0	220.0
Promedio	164.4	5.4	42.6
Mediana	122.0	3.5	15.9
Desviación Estándar.	185.4	3.1	65.0

3.1.5 Mapa de Temperaturas mínimas

El siguiente mapa (Figura 13.) ilustra la distribución de las temperaturas mínimas en el área de estudio

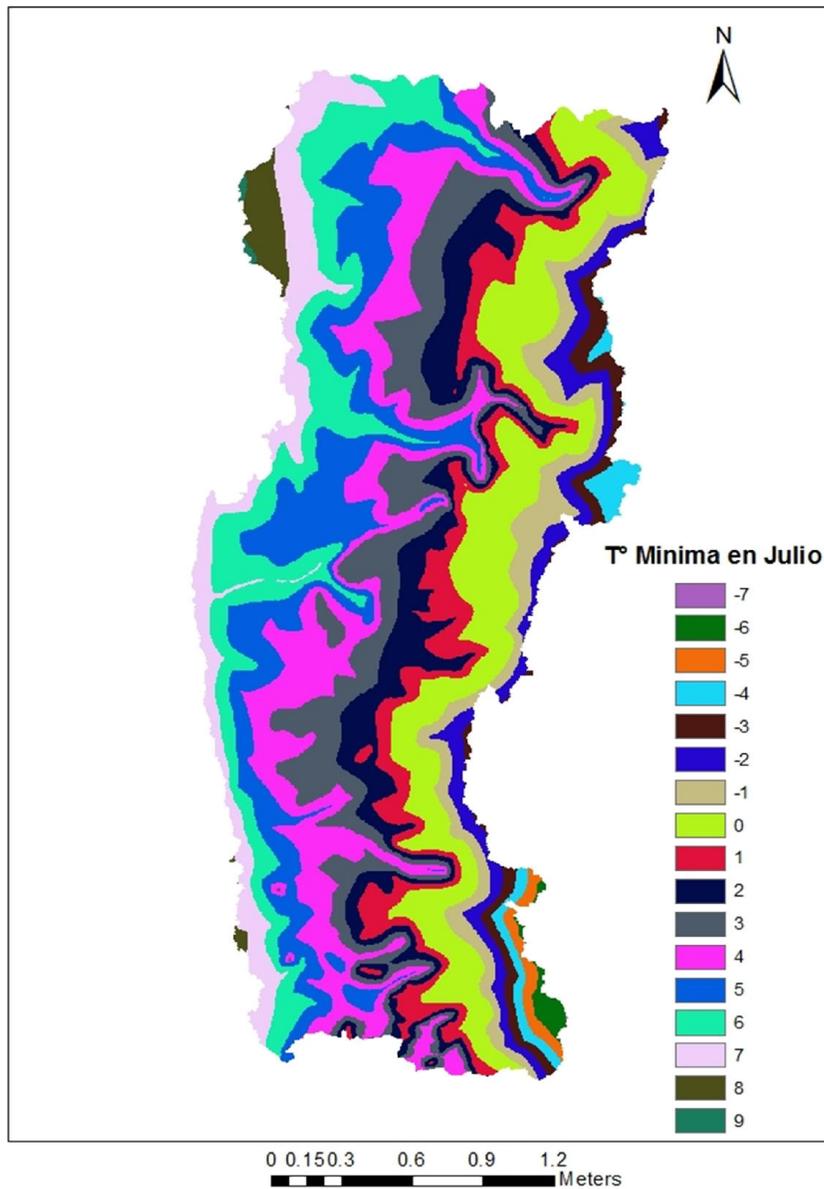


Figura 13. Mapa de la distribución de la T° mínimas de Julio en la región de Coquimbo. Fuente: Uribe *et al.* 2012.

En el mapa se aprecia que la distribución de las temperaturas mínimas están ligadas a la distancia con el mar y la altura geográfica. El primer factor actúa como regulador de las temperaturas extremas, por lo que significa que una mayor cercanía al mar tendrá como consecuencia una temperatura mínima más elevada (Castillo & Castellvi, 2001), el segundo factor afecta de forma inversamente proporcional a las temperaturas mínimas, a mayor altitud más bajas serán estas (Tunarosa, 1969). Ambos factores tienen influencias en el estudio ya que la cercanía al mar provocara que los eventos de heladas sean menos probables que en una región sin influencia marítima, mientras que un cultivo estará más expuesto a las heladas si se encuentra a mayor altura (Battany, 2012).

Este mapa permite definir las zonas que estarán menos expuestas a las heladas, se puede notar que hacia la zona cordillerana (más altura y menos influencia marítima) las temperaturas son cercanas o inferiores a cero, el gradiente entre la zona más cálida (9°C) y la más fría (-7°C) realza la diferencia que se puede producir entre la temperatura de una región en la misma latitud.

En el mapa se puede notar como los valles que se introducen dentro de zonas montañosas presentan unas temperaturas superiores que zonas en su misma longitud pero con mayor altura, además se puede apreciar como los valles presentan una mayor temperatura que las zonas montañosas circundantes, esta diferencia de temperatura los hace más aptos para las actividades agrícolas.

Ahora bien se hace necesario notar que estos datos actúan sobre el promedio de los datos de temperatura, por ende para un análisis de eventos extremos estos sirven solo como referencia para fijar zonas de interés para el estudio de las heladas, así mismo en la escala con la que se elaboró este mapa (1:250.000) no permite un completo análisis de las características topoclimáticas de estaciones puntuales.

Variables meteorológicas críticas que determinan al fenómeno de heladas y desarrollo de modelos.

Fórmulas de los modelos.

Las fórmulas de los modelos sirven para apreciar la relación existente entre las variables independientes y la variable dependiente. Además permite saber el valor de los factores que acompañan a las variables con lo que se logra apreciar la importancia de cada variable respecto al resultado final (Ross, 2005).

Resalta el hecho de que las formulas creadas utilizando toda la gama de resultados utilizan una cantidad mayor de variables respecto a las otras dos opciones, esto va de la mano con la mayor precisión que ofrecen, ya que logran integrar más factores influyentes dentro del modelo, esto sumado a que los modelos tienden a la media. El factor aleatorio (que no acompaña a ninguna variable) es menor según el modelo sea construido con datos más cercanos a la hora modelada, es decir donde existe una mejor relación entre las variables determinantes y la determinada, en otras palabras mientras más preciso el modelo el factor aleatorio tiende a disminuir.

La integración de estas fórmulas al indicador se hará de forma gradual según corresponda a cada hora y el resultado de estas mismas será el factor crítico para el resultado de este. Pero su resultado no será la respuesta del indicador ante un eventual episodio de helada.

Error Medio Cuadrado

El cuadro 5 muestra el error promedio del modelo respecto al valor observado.

Cuadro 6. Error promedio del modelo respecto al valor observado Fuente: Elaboración Propia. (Continúa en la siguiente página).

	Utilizando todos los datos	Utilizando los datos bajo 5 C°	Utilizando los datos bajo 0 C°	
Modelo 6 AM	18:00	2,58	6,96	12,59
	19:00	2,52	5,31	8,47
	20:00	2,47	5,37	8,05
	21:00	2,44	5,27	3,51
	22:00	2,39	5,32	7,55
	23:00	2,35	5,40	7,23
	0:00	1,53	2,89	7,07
	1:00	1,37	2,72	6,88
	2:00	1,19	2,78	6,44
	3:00	0,99	2,50	5,85

Cuadro 6. Error promedio del modelo respecto al valor observado Fuente: Elaboración Propia. (Viene de la página anterior)

		Utilizando todos los datos	Utilizando los datos bajo 5 C°	Utilizando los datos bajo 0 C°
Modelo 7 AM	19:00	2,34	4,96	8,85
	20:00	2,21	4,65	8,40
	21:00	2,05	4,36	8,16
	22:00	1,92	4,16	7,85
	23:00	1,79	3,91	7,75
	0:00	1,71	4,16	7,62
	1:00	1,48	3,36	7,30
	2:00	1,33	3,07	6,76
	3:00	1,18	2,78	6,38
	4:00	1,03	2,47	6,00
Modelo 8 AM	20:00	3,87	5,91	10,13
	21:00	2,11	5,89	9,82
	22:00	2,03	5,51	9,92
	23:00	4,52	5,49	9,64
	0:00	1,97	5,03	9,47
	1:00	1,95	4,87	9,10
	2:00	1,99	4,64	8,64
	3:00	2,28	4,41	8,16
	4:00	2,00	5,34	10,08
	5:00	1,88	2,50	7,48

Se puede apreciar al observar las magnitudes de los errores medios cuadrados, que el modelo creado a partir de todos los datos presenta el error más bajo en las 3 horas de temperaturas mínimas pronosticadas (06:00, 07:00 y 08:00 hrs.), seguido del modelo que utiliza las temperaturas iguales o menores a 5° C y por último el modelo menos preciso es el que considera solo las temperaturas iguales o menores a 0° C. Así mismo este error es más bajo si se utilizan los datos más cercanos a la hora de la temperatura modelada, es decir que el modelo creado con los datos de las 03:00 hrs. es más preciso que uno creado con los datos de las 20:00 hrs. esta situación es concordante con las hipótesis de que los modelos de regresión que utilizan datos de las variables independientes más relacionados con la variable dependiente alcanzan un nivel de exactitud más elevado (Ross, 2005), en este caso las variables medidas temporalmente más cercanas a la hora modelada están más relacionadas.

Otro factor que incide en que el modelo realizado con la totalidad de los registros tenga un error más pequeño es que en una regresión lineal esta tiende a modelar considerando la media aritmética de la muestra de datos como el parámetro “objetivo” y a partir de esta se ajustan los factores según varíen los mismos datos (Ross, 2005), por ende la regresión realizada con todos los datos se ajustará mejor al conjunto completo de los datos, por otro lado si se utilizarán solo las temperaturas bajo 0° C para medir el error de los modelos.

Para efectos de su aplicación el modelo que considera todos los datos como entrada es el más apropiado, teniendo en cuenta la relación que debe existir entre el tiempo necesario para realizar el pronóstico de helada y su nivel de certeza. Sin embargo como sistema de pronóstico el modelo por sí solo no cumple con el requisito de otorgar información sobre la ocurrencia o no de una helada con gran precisión a una hora suficiente para tomar medidas en caso de enfrentar una helada, si no que otorga información crítica para ser utilizada como herramienta en un evaluación capaz de resolver la ocurrencia de un fenómeno de esta naturaleza.

Sobre-estimación o Sub-estimación

La tabla con los porcentajes correspondientes a los datos sub o sobre estimados se encuentra en el Apéndice I., donde se puede apreciar la gran cantidad de datos subestimados por encima de los datos sobreestimados. Esto sucede principalmente en los modelos que consideran subconjuntos de datos solamente (es decir en los casos en que los datos eran igual o menor a 0° y datos igual o menor que 5°), ya que estos al momento de ser generados utilizan los datos de esos rangos. El modelo lineal generado otorgó resultados cercanos a la media de los datos utilizadas para crearla, en este caso la media de los datos sesgados. Por otro lado, el modelo que contempla al conjunto de todos los datos tiende a tener porcentajes equitativos de datos sobre y subestimados (exceptuando las 20:00, 22:00 y 23:00 hrs.), esto sucede por las mismas razones que los modelos anteriores, pero en este caso se utiliza la media de todos los datos para elaborar la regresión.

Considerando el modelo más preciso como base para la elaboración del indicador, modelo que utiliza todos los datos, se aprecia que también es el más equitativo en cuanto a la dispersión de los datos (sub o sobreestimación), esto presupone el mejor ajuste ya que una subestimación podría hacer incurrir en gastos de tiempo y dinero innecesario para las personas objetivos del indicador y en cambio una sobreestimación podría causar pasar por alto eventos afectando los cultivos de las personas objetivo.

Tablas comparativas Variable utilizadas en los modelos

El apéndice II enseña las variables más utilizadas dentro de los modelos de regresión creados, la variable más incidente dentro de las regresiones fue la temperatura mínima horaria, viéndose involucrada en 79 fórmulas de un total de 90, le sigue la velocidad del viento máxima, utilizada 52 veces dentro de los modelos. Estas dos variables se vieron presentes más del 50% de los casos (87,8% y 57,8%, respectivamente), en el caso de la temperatura mínima esta se utiliza como variable de forma exclusiva en 14 casos, vale decir que todos estos casos pertenecen a los modelos que consideran las temperaturas bajo 0° C y 5° C. Con esta información se puede inferir que el fenómeno de la variación de la temperatura mínima, considerando toda la gama de magnitudes que esta puede tomar, es resultado de varios factores que provocan cambios en su resultado final, en la escala de trabajo utilizada los factores son menos al compararlos con una escala menor, ya que la utilizada (250.000:1) no logra involucrar los datos microclimáticos y además el indicador se concentra en variables que pueden ser homologables en toda la región y deja de lado dentro de la construcción del indicador las variables topo climáticas, aun así se estudia la relación de la topografía con el comportamiento de la temperatura mínima en las estaciones puesto que considerarlas es vital en el proceso de toma de decisiones que acompañan al resultado del mismo indicador, ya que una escala pequeña (a nivel de estaciones) implica considerar relaciones de variables meteorológicas con el entorno físico.

Es importante que considerando el nivel de error mostrado por los modelos el estudio de las variables microclimáticas es transcendental a la hora de lograr un análisis que conjuntamente al resultado del indicador logré un pronóstico acertado sobre la ocurrencia de una helada.

Análisis Topoclimático

La influencia del relieve en la temperatura se separa en día y noche. Durante el día las laderas de exposición sur reciben una menor cantidad de radiación solar, por ende su temperatura es más baja, por esta razón en laderas de exposición norte la vegetación presenta una condición más xeromórfica (Luebert y Pliscoff, 2006). Y durante la noche el aire frío se desplaza hacia los lugares más bajos (Castillo y Castellvi, 2001.) Al ser más denso el aire frío tiende a situarse por debajo del aire más cálido lo que produce una circulación del aire frío y cálido hasta alcanzar un equilibrio. Este proceso se manifiesta especialmente en noches con calma ambiental y despejadas, lo que resulta en acumulaciones de aire frío en depresiones del terreno, así es como cualquier obstáculo que impida el libre flujo de aire puede tener mucha importancia en la distribución de las temperaturas nocturnas (Castillo y Castellvi, 2001).

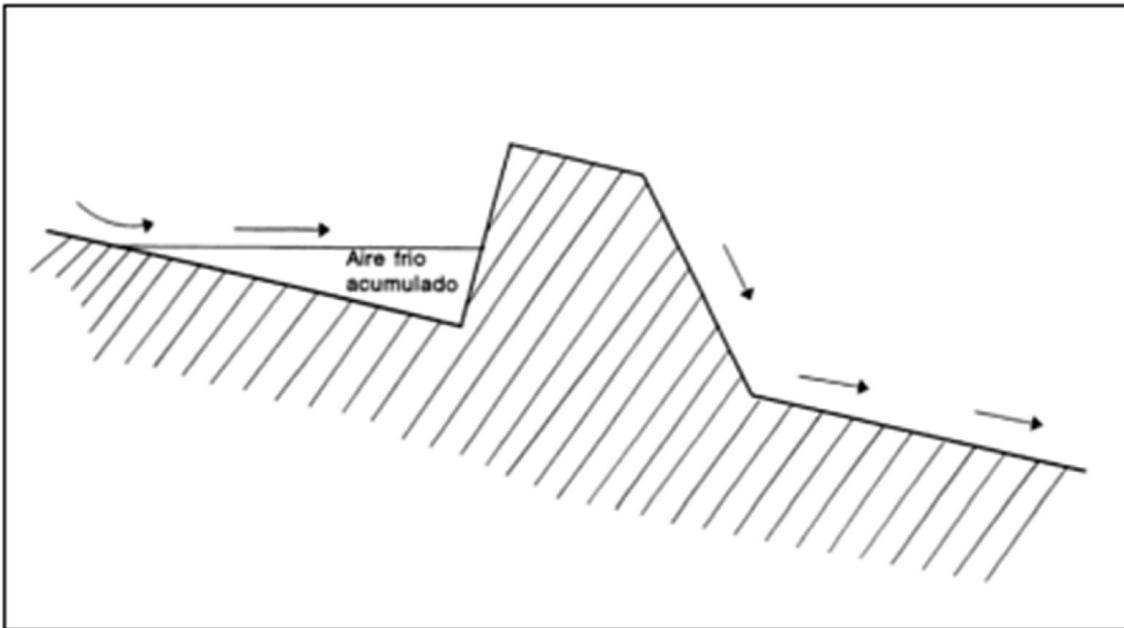


Figura 14. Acumulación de aire frío por un obstáculo. Fuente: (Castillo y Castellvi, 2001.)

Un fenómeno de similares características ocurre en los valles, donde el aire frío se desplaza hacia el fondo de estos, dejando el aire más frío en el fondo de los valles y acumulando un aire con mayor temperatura en las laderas del valle. Este fenómeno es notablemente más

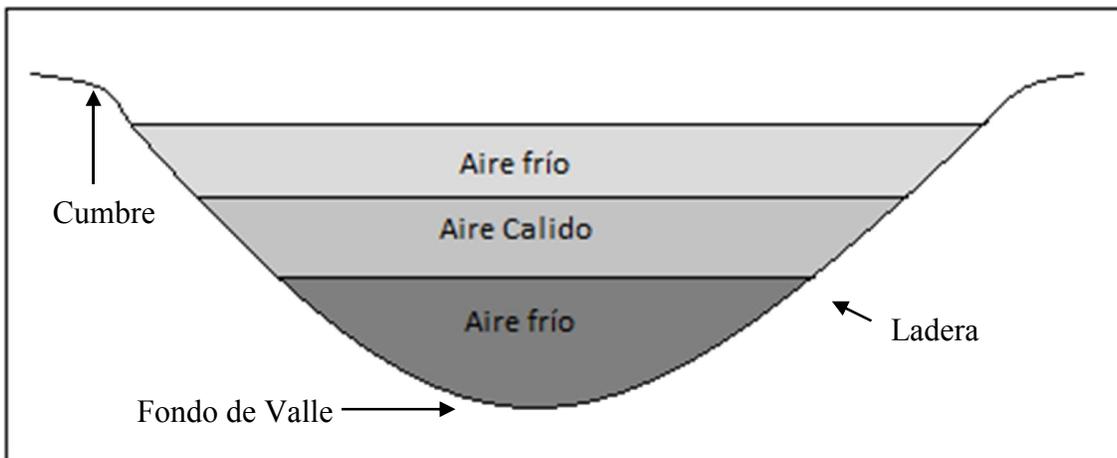


Figura 15. Estratificación de la temperatura en el fondo de los valles y sus laderas. Fuente: Elaboración propia.

Como complemento al análisis que se puede realizar de forma individual para cada estación se adjuntan ciertos datos básicos que determinan relaciones topoclimáticas de las estaciones con la topografía de la región.

Los resultados obtenidos para el análisis topo climático se plasman en la Tabla 6 y el apéndice III.

Cuadro 7. Datos base de las estaciones para su análisis topoclimático Fuente: Elaboración propia. (continúa en la siguiente página).

	Altura (msnm)	Tipo de Clima	Distancia al Mar (Km)	Periodo de Heladas
Llanos de Huanta	1777	Estepa Cálido	94	-
Gabriela Mistral	234	Estepárico Costero o Nuboso	25.8	03-06/24-08
Vicuña (INIA)	667	Estepa Cálido	65.1	11-05/16-09
Pan de Azúcar (Inia)	141	Estepárico Costero o Nuboso	14.6	12-06/15-08
Pisco Elqui	1557	Estepa Cálido	86.2	-
Camarico	249	Estepárico Costero o Nuboso	36.3	04-07/23-07
El Palqui	510	Estepárico Costero o Nuboso	74.6	13-06/14-08
Algarrobo	75	Estepárico Costero o Nuboso	25.1	30-05/28-08
Huintil	597	Estepárico Costero o Nuboso	54.3	06-04/21-10
Illapel	282	Estepárico Costero o Nuboso	32	28-04/29-09

Dentro de las 10 estaciones existen diferencias que se pueden observar en la tabla 6, como la distancia al mar, característica que influye de forma directa en la ocurrencia de un fenómeno de heladas (Jain, 2001), las altura sobre nivel del mar que presume una disminución de la temperatura a medida que esta aumenta (Bustos, 2012) y el clima donde se encuentran las estaciones el cual describe (entre otras cosas) el comportamiento de las temperaturas medias en una región (Zuñiga y Crespo, 2010), pero como una helada se trata de un evento extremo, las clasificaciones climáticas no logran entregar una información concluyente sobre la presencia o ausencia de estas, sin embargo para la clasificación del

periodo libre de heladas si tiene importancia ya que este se calcula utilizando las medias mensuales.

Se deduce considerando la altura y le periodo libre de heladas que las estaciones con temperatura media mínima más baja son llanos de Huanta y Pisco Elqui. Sin embargo se estableció que la estación con mayor cantidad de heladas es Huintil, al observar su posición con los perfiles altitudinales (Apéndice III) se puede observar cómo se encuentra posicionada en el fondo de un valle quedando en una posición crítica donde al producirse el fenómeno de inversión térmica está queda expuesta al aire más frío (fondo de valle), lo que trae como consecuencia que sea un lugar donde las temperaturas frecuentemente alcanzan magnitudes bajo cero. En cambio las otras estaciones se encuentran ubicadas preferentemente en zonas de laderas por donde el aire frío circula sin llegar a estancarse (Castillo & Castellvi, 2001). En el otro extremo está la estación El Palqui, la cual según el perfil altitudinal esta justo en el vértice de una depresión lo que la ubica en un lugar privilegiado al ocurrir el fenómeno de inversión térmica, ya que quedaría fuera del alcance del aire frío que circularía hacia la depresión.

Las otras estación se encuentran ubicadas de forma similar entre ellas dentro de la estructura topográfica de los valles, es decir en una situación intermedia en relación a las dos estaciones recién mencionadas, lo que explicaría su similitud en cuanto a la cantidad de fenómenos registrados.

Perfiles Altitudinales

El apéndice III donde se plasman los perfiles altitudinales de cada estación nos permite comprender como la posición de estas con respecto a los hitos geográficos que la rodean tiene una relación directa con la cantidad de heladas que se pueden producir (Castillo & Castellvi, 2001; Tunarosa, 1969). En esta situación los perfiles altitudinales logran poner en evidencia las diferencias que existen entre las estaciones, especialmente en la influencia del mar con cada una de estas y también sirve para caracterizar la posición de las estaciones respecto a topografía local circundante a estas.

Un caso que resalta la relación de la posición relativa en un valle con la cantidad de heladas es el de la estación Huintil, esta se encuentra ubicada en el fondo del valle en una zona estrecha, es decir donde le fondo del valle no es muy extenso, lo que produce que gracias al fenómeno de inversión térmica de la atmosfera la parte más fría del aire se deposita en el fondo del valle (Moreno, 1999), donde se encuentra esta estación de monitoreo provocando como consecuencia que sea un lugar más propenso a que ocurran fenómenos de heladas.

Por otro lado la estación El Palqui presenta una cantidad muy inferior de heladas respecto al resto de las estaciones, esto también explicado por la posición en que esta se encuentra respecto a la depresión de valle.

Indicador; capacidad de “predicción” de la amenaza y efectividad del indicador

Alcance

El indicador propuesto se basa en datos recolectados de estaciones meteorológicas ubicadas en la Cuarta región, tomando esto en consideración el alcance de este mismo se restringe a la región recién nombrada. A su vez las estaciones meteorológicas se seleccionaron con el objetivo de que sean representativas de los 3 valles agrícolas de la región, asociados al río Elqui, Limari y Choapa. El indicador se desarrolla en conjunto para toda la región, definiendo de esta forma la escala a la cual apunta a otorgar información capaz de pronosticar las heladas a nivel regional.

El alcance del indicador está determinado exclusivamente en consecuencia del lugar de donde provienen los datos y del contexto de la investigación, las características singulares de la región no guardan relación con la elaboración de este, por ende el método es totalmente replicable. Así mismo los resultados particulares aquí obtenidos no sirven de referencia para otras localidades.

En cuanto al alcance horario este indicador se restringe a las 3 horas consideradas más riesgosas (06:00, 07:00 y 08:00), teniendo en cuenta que estas son las horas con mayor cantidad de heladas y además los modelos creados consideran estas 3 horas para su modelación.

Información necesaria para el indicador

Con el objetivo de confeccionar un indicador automatizado los datos se obtendrán de estaciones que cuenten con un sistema de registro en línea y que sean capaces de realizar la retroalimentación necesaria para el funcionamiento de este. En cuanto a la frecuencia de los datos es necesaria que sea horaria, ya que los modelos varían cada una hora. Teniendo en cuenta esto y la fuente de información utilizada para la realización de este indicador, se postula la red de estaciones pertenecientes al Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), dado el formato y frecuencia de medición (WWW.CEAZAMET.CL).

Las entradas requeridas por el indicador son las magnitudes medidas a cada hora de las variables temperatura mínima, promedio y máxima; Velocidad de viento mínimo, promedio y máximo y la humedad relativa mínima, promedio y máxima.

Procesamiento de la información

Una vez recibida la información, esta es aplicada en el modelo que contempla todos los datos y se evalúa para cada hora modelada, que se integraran progresivamente, tal como se aprecia en la Figura 16.

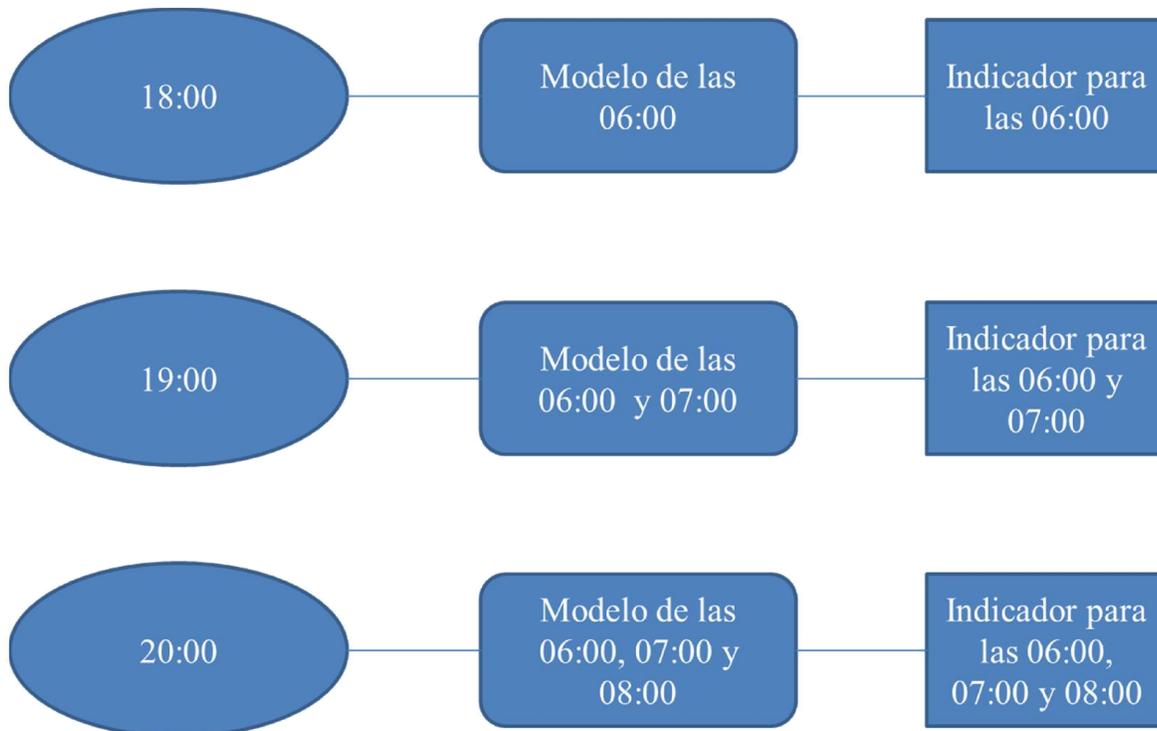


Figura 16. Integración progresiva de los modelos al indicador Fuente: Elaboración propia.

Una vez los datos se ingresen a los modelos y estos calculen las predicciones se hará una clasificación de la amenaza existente. Para esto se utilizarán las predicciones de los modelos correspondientes y el error medio cuadrado presente en la Tabla 5. La relación de estos y el resultado final se expresa en el Cuadro 7.

Cuadro 8. Relaciones que determina el nivel de amenaza en el indicador. Donde; M es el valor de la temperatura determinado por el modelo a la hora objetivo que se quiere modelar y EMC es el error medio cuadrado correspondiente a la hora de donde provienen los registros. Fuente: Elaboración Propia.

Relación	Nivel de Amenaza
$M - 2EMC > 0$	Nula
$M - 2EMC < 0 < M - EMC$	Bajo
$M - EMC < 0 < M - 0.5EMC$	Medio
$M - 0.5EMC < 0 < M$	Alto
$M < 0$	Muy Alto

Respuesta del indicador

El nivel de amenaza asociado a cada relación es la respuesta que surge desde el indicador a las entradas que lo alimentan. Al igual que las entradas, las respuestas del indicador corresponden según cada modelo a una hora puntual y determinan un nivel de amenaza distinto para cada hora, es así como un modelo puede indicar a las 00:00 hrs. un nivel de amenaza alto para las 06:00 hrs. y a la misma hora el modelo correspondiente a las 07:00 hrs. Puede arrojar un nivel de amenaza bajo. Si bien es presumible que existe una coherencia entre los niveles de amenaza considerando la ausencia de entradas de energía al sistema, dentro del indicador cada hora se debe considerar como una respuesta separada.

Ahora bien las respuestas emitidas por este indicador son de referencia, es decir proponen un escenario dados los antecedentes obtenidos y los niveles de error presentados por los modelos, especialmente aquellos que presentan una mayor diferencia de tiempo con las horas de mayor riesgo. Se recomienda utilizar el indicador como una herramienta más dentro del proceso de decisión respecto a la ocurrencia de un evento de helada.

CONCLUSIONES

Las correlaciones conducentes a los modelos lineales entre las variables meteorológicas indicaron que el factor con mayor incidencia en la predicción de una helada es la temperatura mínima horaria (87,8% de las veces) y, en menor grado, la velocidad del viento máxima (57,8% de los modelos). La temperatura mínima es la más influyente al tener la misma naturaleza que la variable dependiente, mientras que la velocidad del viento influye en el fenómeno de inversión térmica, proceso que da paso a una helada de orden radiativo.

Las horas donde se concentran la mayor cantidad de heladas son las 06:00, 07:00 y 08:00 hrs (el 47,6% de las temperaturas bajo cero). Este lapso de tiempo es cuando se ha irradiado la mayor cantidad de energía del sol y por ende donde se alcanza la temperatura más baja.

Congruente con el clima predominante en la Región de Coquimbo el 51,78% de los eventos de heladas se concentran en el mes de Julio, el más representativo de la época invernal.

De las 10 estaciones meteorológicas utilizadas Huintil y El Palqui son las con mayor y menor cantidad de heladas respectivamente, esto debido a las diferencias en su distancia al mar, perfil altitudinal y características topográficas, las cuales influyen en la temperatura.

Los resultados de los modelos de predicción de heladas utilizados tienden a la media de los datos utilizados para su elaboración, esto debido a la naturaleza lineal de dichos modelos. Lo que conlleva una disminución en la precisión de la predicción, esto a consecuencia de que una helada es un evento de temperaturas extremas.

A pesar de que los modelos por si solos no alcanzan una predicción satisfactoria del fenómeno de heladas, si se integran a una estructura de indicador que considere el error medio cuadrado de los modelos y rangos de amenaza se propuso una herramienta capaz de dar información oportuna para una toma de decisión respecto a la amenaza de una helada.

Para mejorar la elaboración de modelos de predicción de heladas es necesario la utilización e investigación de nuevas metodologías en su proceso de construcción, tales como las redes neuronales, análisis topoclimáticos más exhaustivos e investigación con un mayor detalle espacial.

BIBLIOGRAFÍA

Battany, M. 2012. Vineyard frost protection with upward-blowing wind machines. Agricultural and Forest Metereology. 157: 39 – 48.

Bustos, C. 2012. Aplicación de Redes Neuronales al pronóstico de temperatura mínima en la provincia de Mendoza. Dirección de Agricultura y Contingencia Climáticas, Gobierno de Mendoza. Mendoza, Argentina. 9p.

Casas, R. 2011. El suelo de Cultivo y las condiciones climáticas. Editorial Paraninfo. Madrid España. 235p.

Castillo, F.; Castellvi, F. 2001. Agrometereología. Departamento de Medio ambiente y Ciencias del Suelo, Universidad de Lleida. Lérida, España. 519p.

Chereque, W. 1989. Hidrología para estudiantes de ingeniería civil. Pontificia universidad Catolica del Perú. Lima, Perú. 234p.

Currihuinca, J. 2010. Las heladas desde Copiapó a Puerto Montt: sus efectos en los cultivos y métodos de protección. Dirección Meteorológica de Chile. Santiago, Chile. 220p.

Gonzales, C.; Hidalgo, J. 2009. Aspectos Micromnetereológicos y Sinópticos de las Heladas para los Valles Elqui y Limarí durante el período 2004-2007. Tesis para optar al título profesional de Meteorólogo. Valparaiso, Chile. Universidad de Valpraiso. 96p.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas), Chile. 2013. Informe Económico Regional, Enero-Marzo 2013. [Santiago, Chile]: INE. 78 p.

Jain, A. 2001. Predicting air temperature for frost warning using artificial neural networks. B.E. Universidad de Sidney. Sydney, Australia. 92p.

Lueber, F.; Pliscoff, P. 2006. Sinopsis bioclimatica y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 323 p.

Martínez, L.; Ibacache, A.; Rojas, L. 2007. Las Heladas en la Agricultura. La Serena, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Intihuasi. Boletín INIA N°165. 68p.

Moreno, T.; Gibbons, W. 2007. The Geology of Chile. The Geological Society of London. Londres, Inglaterra. 417p.

Naranjo, P. 1947. Las heladas y la necrosis fría de las plantas. Universidad de Texas. Texas, Estados Unidos. 125p.

Ovando, G.; Bocco, M.; Sayago, S. 2005, Enero-Marzo Redes Neuronales para modelar predicción de Heladas. Agricultura Técnica (Chile). 65(1): 65-73.

Rodríguez, M.; Mora, R. 2001. Estadística informática: Casos y ejemplos con el SPSS. Servicio de publicaciones, Universidad de Alicante. Alicante, España. 310p.

Ross, S. 2005. Introducción a la Estadística. Editorial Reverté. Barcelona, España. 817p.

Sánchez, A.; Morales, R. 1990. Las regiones de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile 283p

Smith, B.; Ronald W.; Hoogenboom, G. 2006, Marzo. Improving Air Temperature Prediction with Artificial Neural Networks. Revista Internacional de Inteligencia Computacional. 3(3). 179 -186.

Snyder, R.; Melo-Abreu, J. 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Series Sobre el Medio Ambiente y la gestión de los Recursos Naturales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 241p.

Tunarosa, V. 1969. Topoclimatología de la ladera del volcán Turrialba, Costa Rica. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias. Costa Rica: Instituto interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Centro de Enseñanza e investigación. 244p.

Uribe, J.; Cabrera, C.; De la Fuente, A.; Paneque, M. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 232 p.

van Leeuwen, C. 2010. 9-Terroir: the effect of the physical environment on vine growth, grape ripening and wine sensory attributes. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2010. 273 – 315.

Villalobos, F.; Mateos, L.; Orgaz, F.; Fereres, E. 2009. Fitotecnia bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi-Prensa. Madrid, España. 495p.

APÉNDICES

Apéndice I. Cantidad de datos sobre estimados y sub estimados.

Cuadro 9. Porcentaje de datos sub estimados y sobre estimados por los modelos. Fuente: Elaboración propia.

Hora	Utilizando todos los datos		Utilizando los datos bajo 5 C°		Utilizando los datos bajo 0 C°	
	Datos		Datos		Datos	
	Subestimación (%)	Sobrestimación (%)	Subestimación (%)	Sobrestimación (%)	Subestimación (%)	Sobrestimación (%)
18:00	65.92	34.08	94.29	5.71	99.56	0.44
19:00	51.06	48.94	91.79	8.21	99.00	1.00
20:00	51.60	48.40	91.70	8.30	98.58	1.42
21:00	50.03	49.97	92.04	7.96	25.84	74.16
22:00	49.82	50.18	92.16	7.84	98.42	1.58
23:00	49.23	50.77	92.27	7.73	98.12	1.88
0:00	46.43	53.57	87.34	12.66	99.13	0.87
1:00	46.01	53.99	89.16	10.84	99.02	0.98
2:00	46.17	53.83	90.59	9.41	98.94	1.06
3:00	45.92	54.08	90.54	9.46	99.05	0.95
19:00	50.82	49.18	91.23	8.77	99.11	0.89
20:00	45.65	54.35	90.77	9.23	99.07	0.93
21:00	50.29	49.71	90.70	9.30	99.04	0.96
22:00	49.45	50.55	90.70	9.30	98.97	1.03
23:00	48.64	51.36	90.51	9.49	98.94	1.06
0:00	49.48	50.52	91.29	8.71	98.82	1.18
1:00	48.07	51.93	90.40	9.60	98.99	1.01
2:00	47.25	52.75	90.15	9.85	98.98	1.02
3:00	54.71	45.29	89.99	10.01	98.99	1.01
4:00	46.03	53.97	89.46	10.54	98.98	1.02
20:00	10.64	89.36	92.96	7.04	99.28	0.72
21:00	51.75	48.25	93.99	6.01	99.27	0.73
22:00	99.88	0.12	93.77	6.23	99.49	0.51
23:00	94.95	5.05	93.99	6.01	99.27	0.73
0:00	45.94	54.06	92.74	7.26	99.24	0.76
1:00	44.67	55.33	92.55	7.45	99.23	0.77
2:00	38.97	61.03	92.52	7.48	99.22	0.78
3:00	26.27	73.73	92.28	7.72	99.18	0.82
4:00	41.39	58.61	93.30	6.70	99.27	0.73
5:00	37.30	62.70	33.37	66.63	99.21	0.79

Apéndice II. Cantidad de variables utilizadas por horas y tipo de modelo

Cuadro 10. Cantidad de variables por cada modelo según hora y tipo de modelo. Fuente: Elaboración Propia. (Continúa en las siguientes 3 páginas)

Modelo	Hora	T° Minima	T° Media	T° Maxima	Velocidad de Viento Minima	Velocidad de Viento Promedio	Velocidad de Viento Maxima	Humedad relativa Minima	Humedad relativa Promedio	Humedad relativa Maxima	Total
Modelo 6 AM Bajo Cero	18:00			1						1	2
	19:00	1							1		2
	20:00	1							1		2
	21:00		1	1	1						3
	22:00	1									1
	23:00	1									1
	0:00	1									1
	1:00	1									1
	2:00	1									1
	3:00	1									1
Modelo 7 AM Bajo Cero	19:00		1		1	1					3
	20:00	1									1
	21:00	1									1
	22:00	1									1
	23:00		1								1
	0:00	1									1
1:00		1	1							2	

	2:00	1								1
	3:00	1								1
	4:00	1						1	1	3
	20:00	1	1							2
	21:00	1					1		1	3
	22:00		1	1			1	1		4
	23:00	1					1			2
Modelo 8	0:00	1					1	1		3
AM Bajo	1:00	1			1			1		3
Cero	2:00	1							1	2
	3:00	1							1	2
	4:00	1						1		2
	5:00	1								1
	18:00	1		1		1	1		1	5
	19:00		1	1		1	1		1	5
	20:00	1						1		2
Modelo 6	21:00		1			1				3
AM Bajo	22:00		1			1	1		1	4
5°C	23:00			1		1	1		1	4
	0:00	1					1			2
	1:00	1					1			2
	2:00	1					1		1	3
	3:00	1			1	1			1	5
	19:00	1		1		1	1		1	6
Modelo 7	20:00	1	1		1	1	1	1		6
AM Bajo	21:00	1			1	1	1			4
5°C	22:00	1			1	1	1			4
	23:00	1			1	1	1			4

	0:00	1			1		1			3
	1:00	1					1			2
	2:00	1					1			2
	3:00	1					1			2
	4:00	1					1			2
	20:00	1		1	1		1	1	1	6
	21:00	1		1				1	1	4
	22:00	1								1
	23:00	1					1			2
Modelo 8	0:00	1					1			2
AM Bajo	1:00	1					1			2
5°C	2:00	1		1			1			3
	3:00	1		1			1			3
	4:00	1		1		1	1		1	5
	5:00	1		1			1		1	4
	18:00	1		1	1	1	1		1	6
	19:00	1		1	1	1	1		1	6
	20:00	1	1	1	1	1	1		1	8
	21:00		1	1	1					3
Modelo 6	22:00	1			1	1	1		1	6
AM Todos	23:00	1		1	1	1	1		1	6
los datos	0:00	1		1	1	1	1		1	7
	1:00	1	1			1			1	5
	2:00	1	1			1			1	5
	3:00	1	1						1	4
	19:00	1		1	1	1	1		1	6
Modelo 7	20:00	1		1	1	1	1		1	7
AM Todos	21:00	1		1	1	1	1		1	7
los Datos	22:00	1	1	1	1	1	1		1	8

	23:00	1	1	1	1	1	1		1	1	8
	0:00	1	1		1	1	1	1		1	7
	1:00	1		1		1	1	1		1	6
	2:00	1		1		1	1	1		1	6
	3:00	1	1	1		1	1		1	1	7
	4:00	1		1	1		1	1		1	6
	20:00	1		1	1		1			1	5
	21:00	1		1	1	1	1	1	1	1	8
	22:00	1	1	1	1	1	1		1	1	8
	23:00	1	1			1	1			1	5
Modelo 8	0:00	1		1		1	1			1	5
AM Todos	1:00	1		1	1		1			1	5
los Datos	2:00	1		1	1		1			1	5
	3:00	1		1	1		1			1	5
	4:00	1		1		1	1	1			5
	5:00	1		1	1		1		1		5
Total		79	21	36	31	37	52	19	28	33	336

(Viene desde las 3 páginas anteriores)

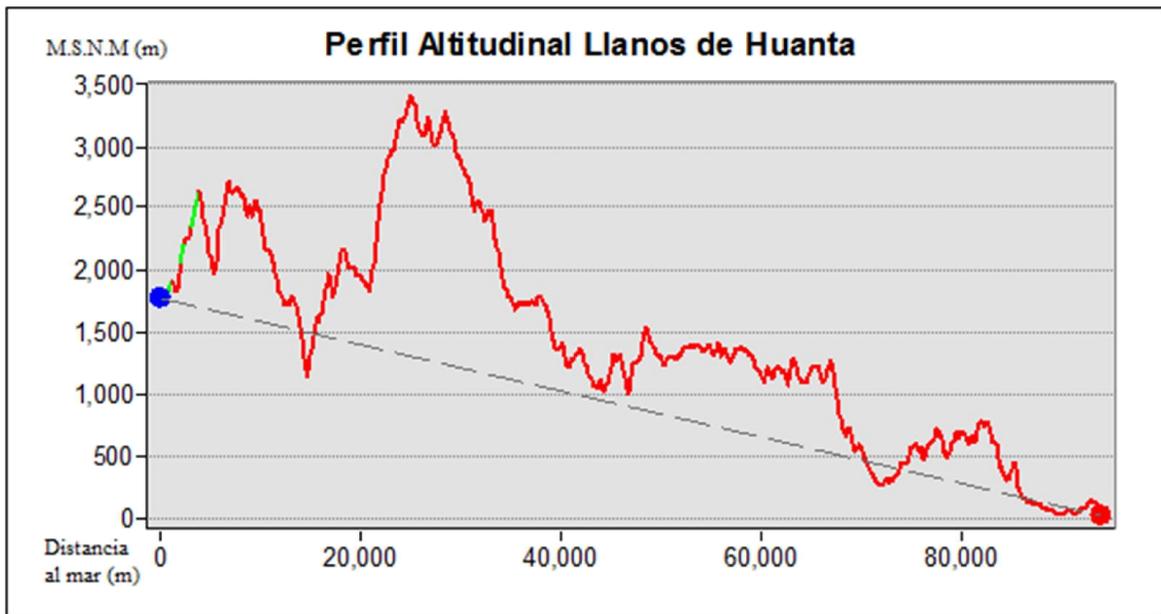
Apéndice III. Perfiles Altitudinales.

Figura 17. Perfil Altitudinal estación Llano de Huanta. Fuente: Elaboración Propia

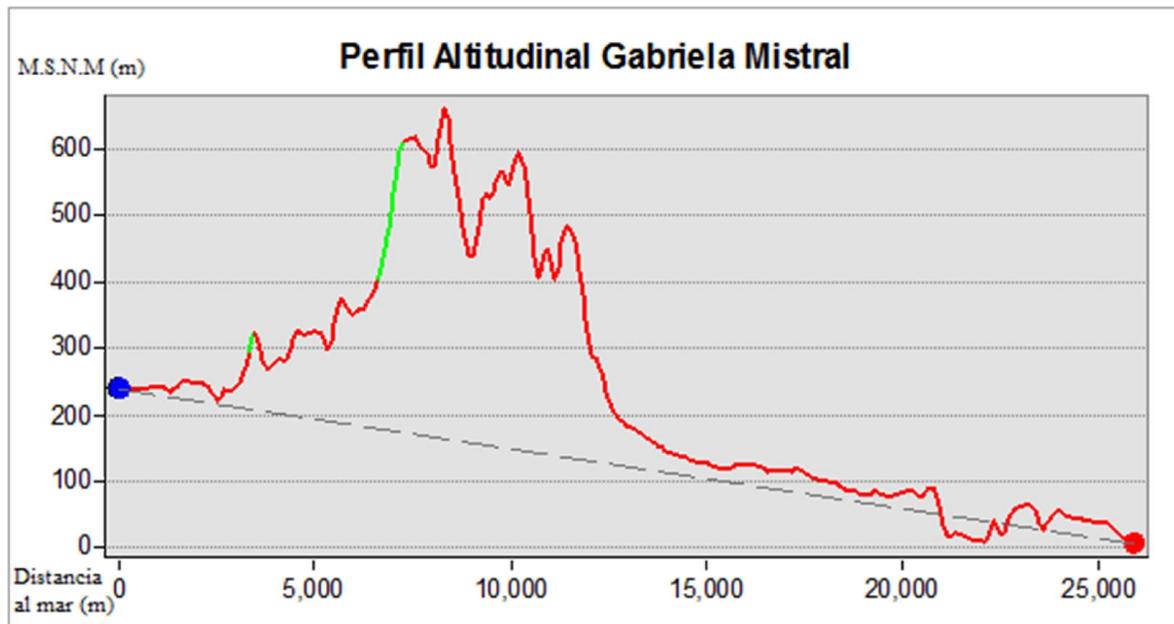


Figura18. Perfil Altitudinal estación Gabriela Mistral. Fuente: Elaboración Propia

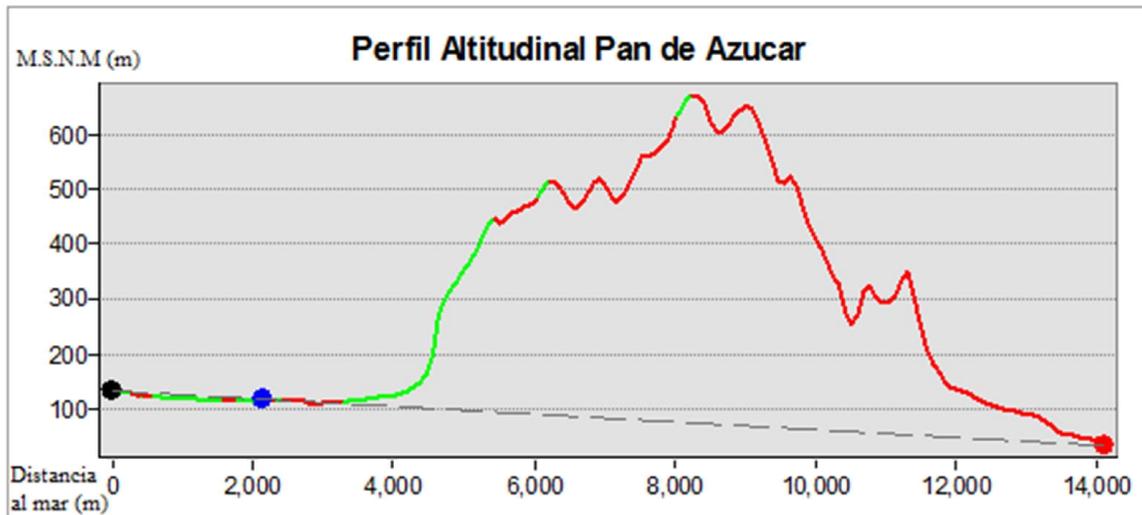


Figura 19. Perfil Altitudinal estación Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.

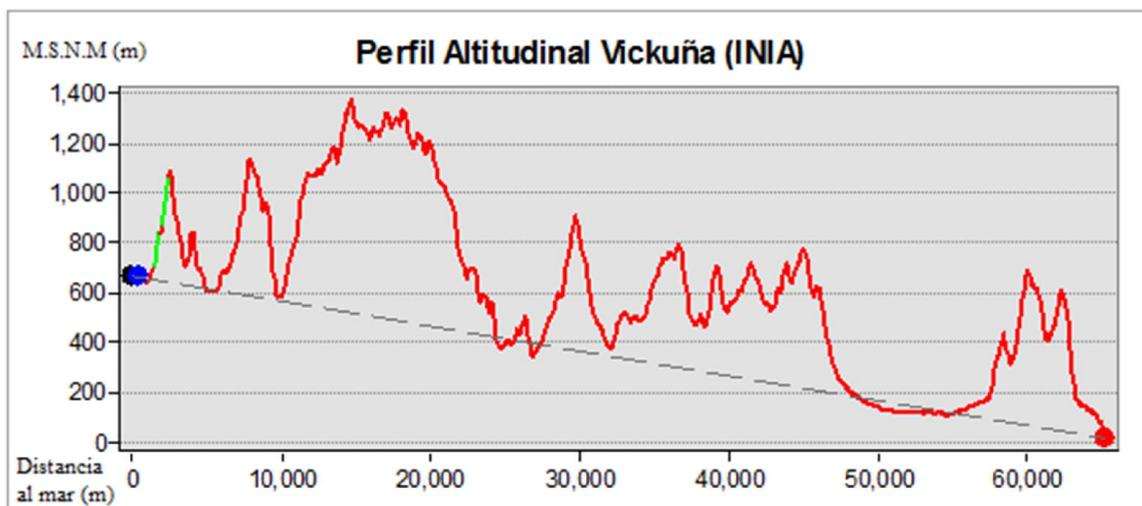


Figura 20. Perfil Altitudinal estación Vickuña (INIA). Fuente: Elaboración Propia.

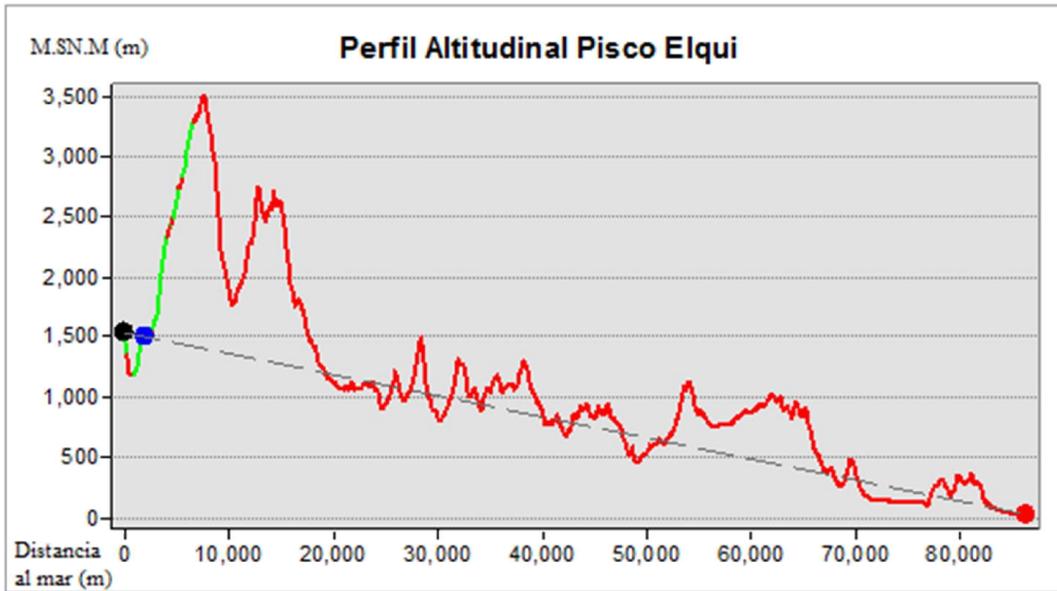


Figura 21. Perfil Altitudinal estación Pisco Elqui. Fuente: Elaboración Propia.

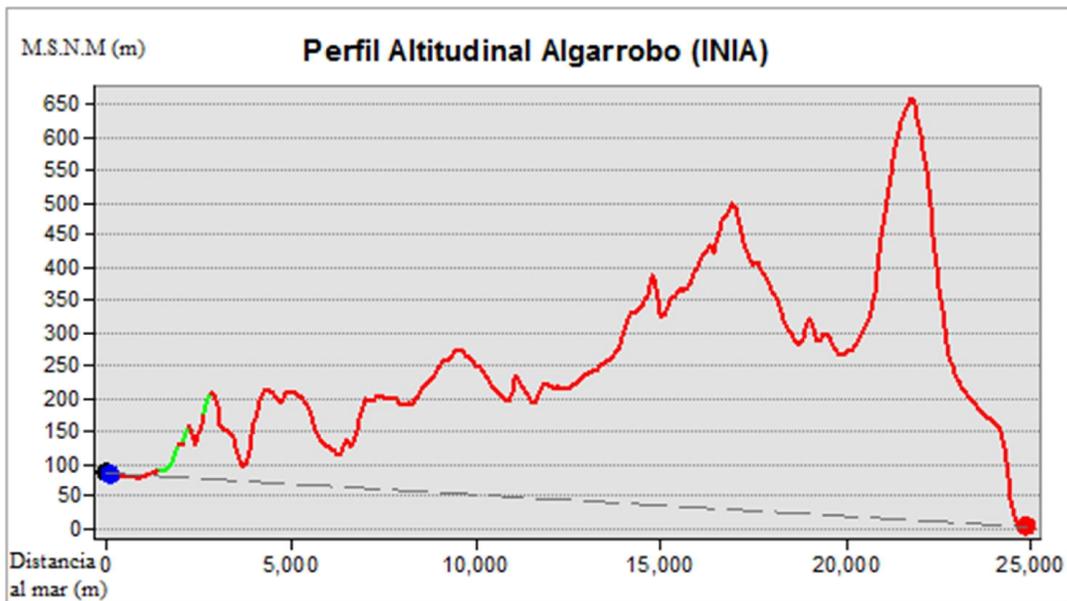


Figura 22. Perfil Altitudinal estación Algarrobo (INIA). Fuente: Elaboración Propia.

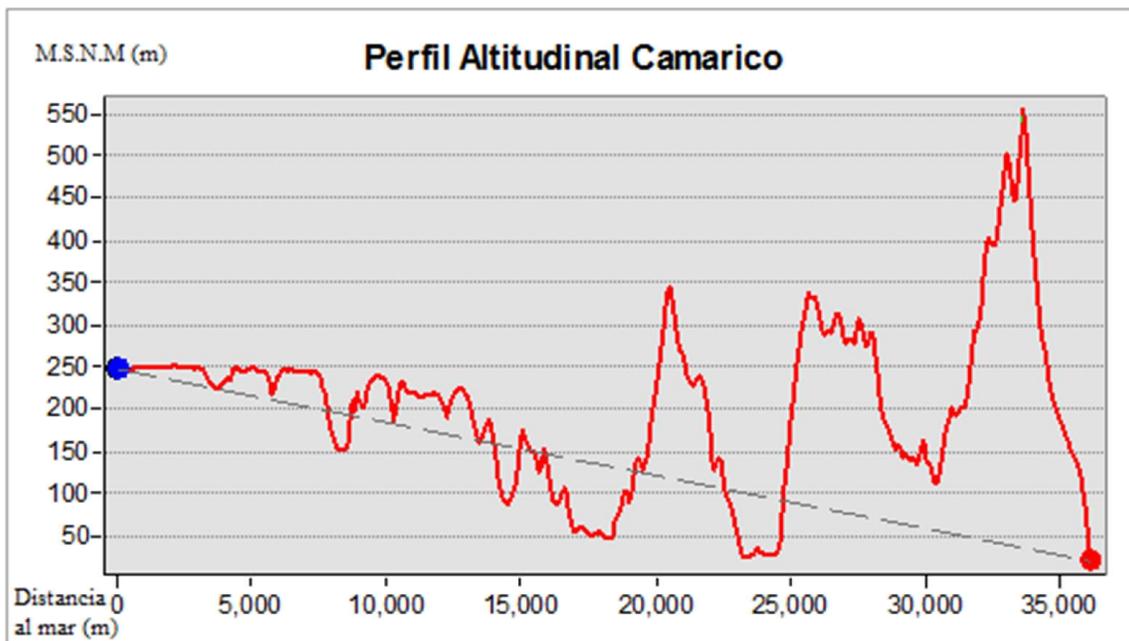


Figura 23. Perfil Altitudinal estación Camarico. Fuente: Elaboración Propia

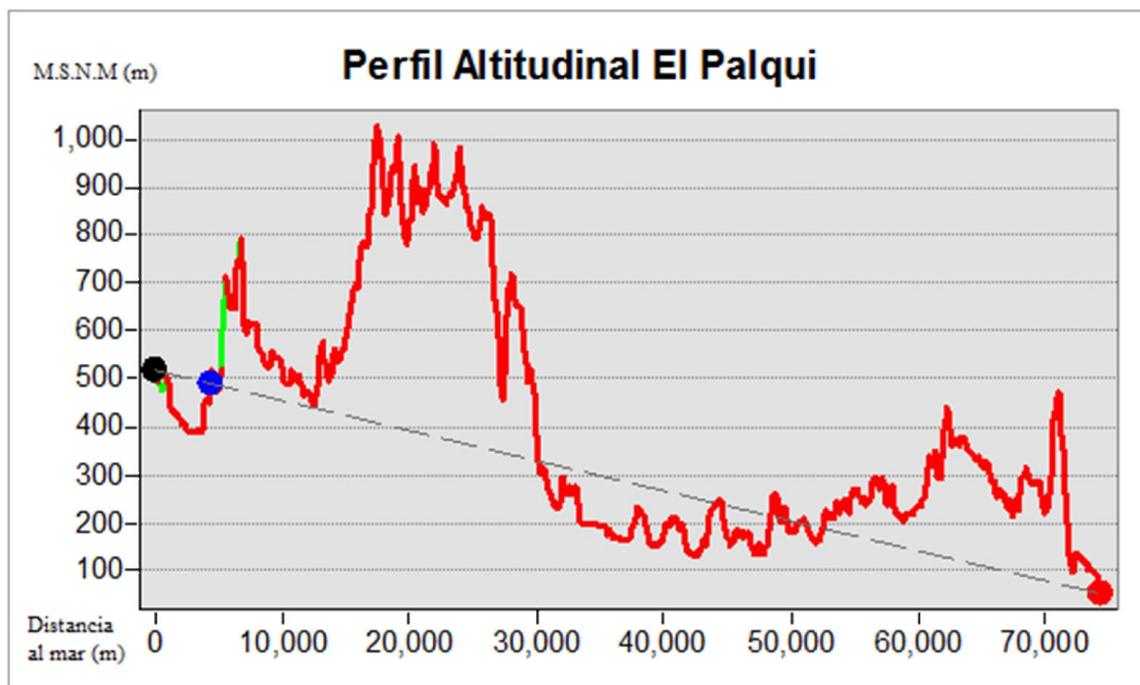


Figura 24. Perfil Altitudinal estación El Palqui. Fuente: Elaboración Propia

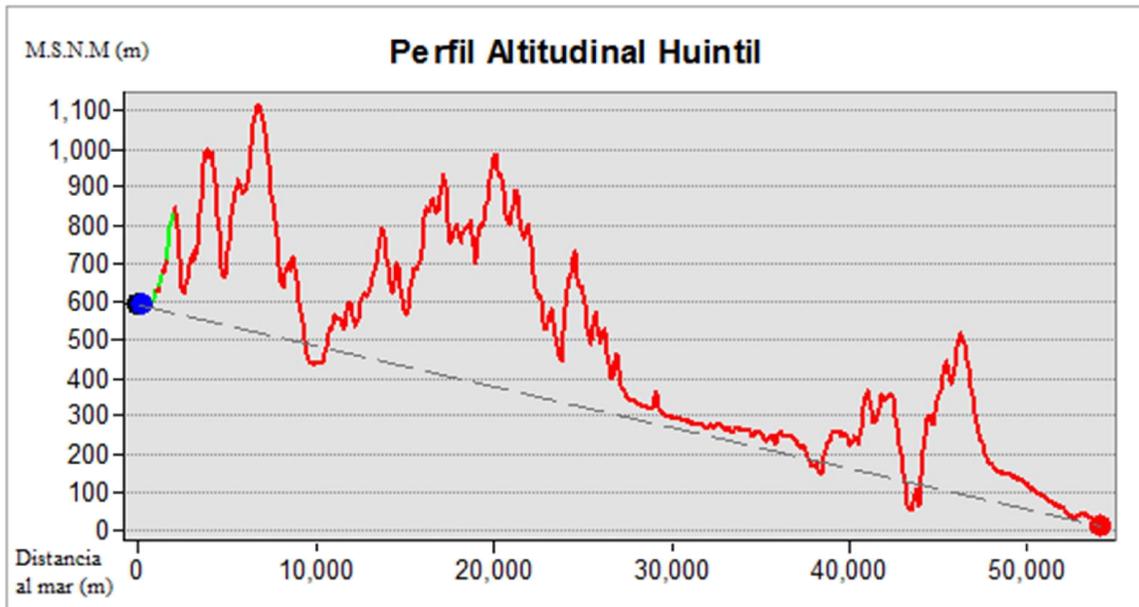


Figura 25. Perfil Altitudinal estación Huintil. Fuente: Elaboración Propia

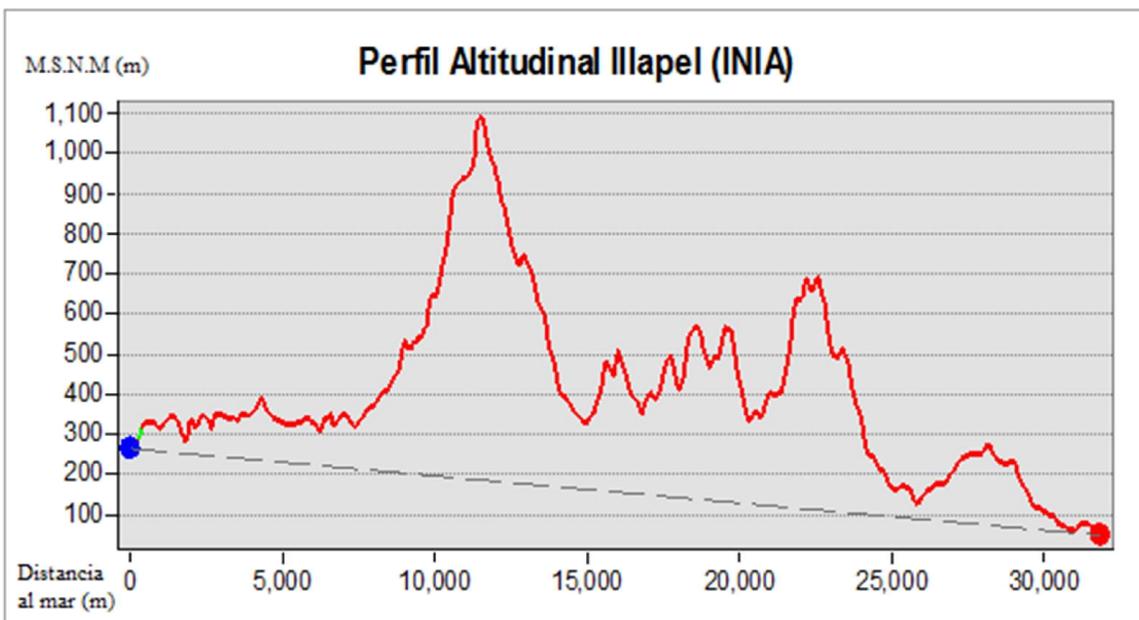


Figura 26. Perfil Altitudinal estación Illapel. Fuente: Elaboración Propia.