

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**INTERPOLACIÓN TEMPORAL DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL A
PARTIR DE MAPAS TRAZADOS POR EXPERTOS, MEDIANTE EL MODELO
PROPUESTO POR CHARLES-EDWARDS**

FELIPE LUIS HERNÁNDEZ MORA

SANTIAGO, CHILE

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**INTERPOLACIÓN TEMPORAL DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL A
PARTIR DE MAPAS TRAZADOS POR EXPERTOS, MEDIANTE EL MODELO
PROPUESTO POR CHARLES-EDWARDS**

**TEMPORAL INTERPOLATION OF MEAN MONTHLY TEMPERATURE FROM
MAPS DRAWN UP BY EXPERTS THROUGH THE MODEL PROPOSED BY
CHARLES-EDWARDS.**

FELIPE LUIS HERNÁNDEZ MORA

SANTIAGO, CHILE

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

**INTERPOLACIÓN TEMPORAL DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL A
PARTIR DE MAPAS TRAZADOS POR EXPERO, MEDIANTE EL MODELO
PROPUESTO POR CHARLES-EDWARDS**

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

FELIPE LUIS HERNÁNDEZ MORA

	Calificaciones
Profesores Guías	
J. Andrés de la Fuente de la F. Ingeniero Agrónomo	6,5
Juan Uribe M. Ingeniero Agrónomo	6,0
Profesores Evaluadores	
Luis Morales S. Profesor de Ciencias Naturales y Físicas, Dr.	6,5
Ricardo Marchant S. Ingeniero Agrónomo Mg. Sc.	6,0
Colaborador	
Francisco Lang T. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables	

SANTIAGO, CHILE

2013

AGRADECIMIENTOS

En esta página en la que se nos permite explayarnos, hablar en primera persona (a diferencia de en las páginas siguientes) y expresar nuestra gratitud quisiera aprovechar de agradecer a mis padres, Luis y Marcela, no solo por lo que respecta a esta memoria de título o a mi travesía universitaria, si no que agradecerles por su presencia, apoyo, y amor desde siempre, sin ellos no sería lo que soy (con defectos y virtudes), por eso ¡MUCHAS GRACIAS, LOS AMO!

Agradecer también a toda mi familia, Abuelas, Tíos, Primos, Hermanos, etc, por entregarme su apoyo incondicional en este largo proceso.

No puedo dejar de agradecer a mis amigos, que siempre estuvieron dispuestos a colaborar y ofrecer su ayuda incondicional en todo momento, con ellos he aprendido el valor de la amistad.

Finalmente agradecer a todos quienes han colaborado de una u otra forma en esta memoria y en mayor o menor medida, muchos colaboraron con su granito de arena y por eso se merecen una mención en esta página.

INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
INTRODUCCIÓN	5
<i>Objetivo General.....</i>	<i>8</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>8</i>
MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	9
MATERIALES	11
MÉTODOS.....	11
<i>Generación de los mapas de temperatura media mensual mediante la utilización del modelo propuesto por Charles-Edwards.</i>	<i>12</i>
Modelo basado en las relaciones aproximadas obtenidas por Charles-Edwards	12
Generación de mapas de temperatura media mensual	13
<i>Pre procesamiento de la información.....</i>	<i>13</i>
Pre procesamiento de los mapas trazados por el experto.....	14
Obtención de parámetros de entrada para el modelo propuesto por Charles-Edwards.....	14
<i>Determinación del grado de concordancia entre la interpolación realizada mediante el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto.</i>	<i>16</i>
Obtención del error de la estimación	16
Análisis de Similaridad Cartográfica	17
Análisis cualitativo de la concordancia entre la interpolación realizada por el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto.....	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
PRE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	21
GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL MODELO PROPUESTO POR CHARLES-EDWARDS	25
<i>Modelo basado en las relaciones aproximadas obtenidas por Charles-Edwards.....</i>	<i>25</i>
<i>Generación de mapas de temperatura media mensual.....</i>	<i>30</i>
DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CONCORDANCIA ENTRE LA INTERPOLACIÓN REALIZADA MEDIANTE EL MÉTODO DE CHARLES-EDWARDS Y LOS MAPAS TRAZADOS POR EL EXPERTO	36
<i>Obtención del error de la estimación.....</i>	<i>36</i>
<i>Análisis de Similaridad Cartográfica</i>	<i>37</i>
<i>Análisis cualitativo de la concordancia entre la interpolación realizada por el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto.....</i>	<i>45</i>
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

ANEXO I.....	69
APÉNDICE I	74
APÉNDICE II.....	80

RESUMEN

La temperatura es uno de los factores que determina las características del clima y es el principal regulador del funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Una de las principales áreas de investigación de la temperatura del aire corresponde a la generación de cartografías climáticas, las que se han llevado a cabo principalmente siguiendo dos corrientes: Mapas analógicos y Mapas desarrollados de forma automatizada. Estos últimos son considerados aproximaciones bastante cercanas a la realidad, sobre todo en condiciones topográficas complejas y ante escasas de una red adecuada de estaciones meteorológicas. Sin embargo, estos demandan gran cantidad de tiempo y conocimiento, sin mencionar la necesidad de un experto.

Una alternativa sería utilizar el modelo propuesto por Charles-Edwards para interpolar la variable temperatura media mensual para todo un año a partir de cartografías analógicas de los meses extremos, sin embargo, es necesario determinar si el modelo propuesto por Charles-Edwards es capaz de preservar el comportamiento espacio temporal inferido por el experto. Para este fin se calcularon los mapas de temperatura media mensual para un año utilizando el método mencionado anteriormente. Posteriormente, estos mapas fueron sometidos a análisis cuantitativos y cualitativos para determinar el grado de concordancia con los mapas trazados por el experto.

De estos análisis se pudo observar que el modelo propuesto por Charles-Edwards conserva el patrón de distribución inferido por el experto, sobre todo en los meses de enero y julio. Sin embargo, en cuanto a la estimación del valor de la variable se encontraron diferencias considerables entre ambos métodos, atribuibles principalmente a la influencia de la amplitud térmica en el modelo propuesto por Charles-Edwards.

Finalmente, se puede concluir que el modelo preserva la distribución espacial de la variable inferida por el experto principalmente debido a que esta es incorporada en la interpolación mediante la utilización de los mapas de los meses extremos como insumo en el cálculo de la temperatura media mensual, además se concluye que debido a que, en cuanto al comportamiento espacio-temporal de la variable, el modelo presentó resultados satisfactorios, la posibilidad de utilizarlo como interpolador temporal a partir del trazado experto de los meses extremos en zonas con baja densidad de estaciones meteorológicas es cierta, siempre y cuando se realicen ajustes que disminuyan el error en la estimación del valor de la variable.

Palabras Claves: Mapas Trazados por Experto, Temperatura Media Mensual, Interpolación.

ABSTRACT

Temperature is one of the factors that determines the characteristics of the climate and is the primary regulator of the functioning of terrestrial ecosystems. One of the main research areas of air temperature corresponds to the generation of weather maps, which were carried out mainly along two streams: Maps and Maps analogue developed automated. The latter are considered fairly close approximations to reality, especially in complex topography and to shortage of an adequate network of weather stations. However, these are very demanding of time and knowledge, not to mention the need for an expert.

An alternative would be to use the model proposed by Charles-Edwards to interpolate the variable average monthly temperature for an entire year from analogue maps of extreme months, however it is necessary to determine whether the model proposed by Charles-Edwards is able to preserve the spatiotemporal behavior inferred by the expert. For this purpose maps were calculated mean monthly temperature for one year using the above method. Subsequently, these maps were subjected to quantitative and qualitative analysis to determine the level of agreement with the maps drawn by the expert.

From these analyzes it was observed that the model proposed by Charles-Edwards retains the distribution pattern inferred by the expert, especially in the months of January and July. However, regarding the estimation of the value of the variable, significant differences were found between the two methods, mainly attributable to the influence of the temperature range in the model proposed by Charles-Edwards.

Finally, it can be concluded that the model preserves the spatial distribution of the variable inferred by the expert mainly because this is incorporated in the interpolation by using the maps as input ends months calculating the mean monthly temperature. It also concludes that because, in terms of space-time behavior of the variable, the model showed good results, the possibility as a temporal interpolator expert drawn from the extreme months in areas with low density of meteorological stations is some as long as adjustments are made to reduce the error in estimating the value of the variable.

Key Words: Human-Expert mapping, monthly average temperature, interpolation

INTRODUCCIÓN

El clima está compuesto de elementos que son variables en el tiempo y en el espacio, los cuales son de vital importancia en ámbitos científicos, económicos y ambientales debido a que los factores climáticos determinan la distribución y el comportamiento de los organismos (Ferrer, s.a.), por lo que contar con información climática es de gran utilidad. Dentro de estas variables climáticas la temperatura es uno de los factores que en mayor medida determina las características del clima y es el principal regulador del funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Villalobos *et al.*, 2002), lo que hace que su estudio sea de gran relevancia para la planificación de diferentes actividades.

Una de las principales áreas de investigación de la temperatura del aire, como de otras variables climáticas, corresponde a la generación de cartografías climáticas, las que se ha llevado a cabo principalmente siguiendo dos corrientes: Mapas analógicos (Trazados por expertos) y Mapas desarrollados de forma automatizada (Lopez *et al.*, 2001).

Los métodos automatizados han tenido un gran desarrollo y proliferación en los últimos años, debido al potencial que éstos tienen en términos de velocidad, consistencia y replicabilidad. Estos métodos se valen de información adquirida *in situ* para posteriormente, mediante diversos métodos de interpolación, generar un mapa continuo de la variable climática. Los métodos más comúnmente utilizados para estimar la temperatura y la precipitación son la ponderación por la distancia, los polinomios, el “kriging” y el “Spline” (Ibañez y Rosell, 2001).

La precisión y realismo de estos métodos depende en gran medida de la disponibilidad de datos proporcionados por estaciones meteorológicas. Sin embargo, las estaciones meteorológicas no siempre poseen la representatividad y distribución necesarias para conocer el comportamiento de la temperatura, tanto espacial como temporal. Esto representa un problema para los métodos de interpolación, puesto que estos modelos en general carecen de una base de conocimiento causal de los factores climáticos, lo que ha hecho que muchas veces no logren la precisión, detalle y realismo que proporcionan los mapas trazados por expertos cuando la disponibilidad de datos requeridos no es la adecuada (Daly *et al.*, 2002).

Dentro de esta categoría existen también modelos que incluyen la variable temporal permitiendo realizar interpolaciones de temperatura para un periodo determinado de tiempo a partir de información obtenida de momentos determinados. En este ámbito uno de los modelos más ampliamente utilizado es el propuesto por Charles-Edwards en 1982 (Ortiz, 2007) para calcular la temperatura media diaria a lo largo de un año. Este modelo se basa en el comportamiento senoidal de la temperatura a lo largo del año y utiliza como datos de entrada la amplitud térmica, la temperatura media anual, el día juliano y la latitud (Charles-Edwards, 1982).

Estos métodos han sido utilizados para generar cartografías climáticas de áreas de unos pocos miles de kilómetros, hasta escalas continentales (Kurtsman y Kadmon, 1999). La mayoría de estos modelos corresponden a ecuaciones obtenidas mediante correlaciones estadísticas, también llamados modelos empíricos. Estos describen la relación entre las variables sin hacer referencia a los procesos correlacionados. Sin embargo, esta corriente progresa constantemente de la mano de las tecnologías en que se apoyan, siendo cada vez más utilizados y validados, a tal punto que actualmente gran parte de las investigaciones en el área las utilizan. Algunos ejemplos fueron presentados por Stahl *et al.* (2006) donde se realizan comparaciones entre métodos de este tipo para calcular la temperatura media diaria; Price *et al.* (2000) donde se revisan dos métodos estadísticos para la interpolación de datos climáticos (ANUSPLINE y GIDS) y Wang y Hou (2009) quienes utilizan una regresión lineal múltiple para estimar temperatura media anual en la Antártica, entre otros.

Por otro lado se tienen las cartografías realizadas de forma manual o analógica que da al climatólogo mayor control sobre el proceso, otorgándole la posibilidad de incorporar detalles y características particulares del comportamiento de la variable cartografiada conocidas o inferidas por el experto que no podrían ser incorporadas de otra forma, entregando mayor precisión a la cartografía que la que ofrecen los métodos automatizados (Ferrer, s.a.). Ejemplo de este tipo de cartografías son las isoyetas e isotermas, aunque la incorporación de nuevas tecnologías ha permitido desarrollar mapas continuos en los cuales es el experto quien determina el comportamiento de la variable.

Todos tienen sus propios conceptos de cómo funciona el mundo y por qué ocurren ciertas cosas, todas las hipótesis que se prueban tienen un sistema de conocimiento que las apoyan (Dourado-Neto *et al.*, 1998) y la aproximación del trazado experto se basa en conjugar este conocimiento, la experiencia y capacidades que tiene uno o más expertos respecto a la variable que se desea interpretar y al área de estudio, para inferir los patrones climáticos. Este método es considerado como una aproximación bastante cercana a la realidad, sobre todo en condiciones complicadas - como zonas de topografía compleja - en las que no es posible ajustar un modelo estadístico que dé cuenta del comportamiento de la variable objeto de estudio (Shao *et al.*, 2007). Mapas de este tipo se pueden observar en la actualización de 1993 del Atlas Nacional de España (Bustamante, 2003), en los Mapas de precipitaciones desarrollados en la década de los sesenta por las Agencias federales de los Estados Unidos, los que fueron ampliamente aceptados (Daly *et al.*, 2002) y en el Atlas Agroclimático de Chile (Santibáñez y Uribe, 1993).

Sin embargo, el trazado experto presenta la desventaja de ser muy demandante de conocimiento y tiempo, sin considerar la necesidad de contar con un experto, lo que hace deseable contar con métodos que permitan automatizar, a lo menos en parte, el proceso de obtención de información cartográfica.

Considerando las limitaciones y ventajas de ambos métodos (Mapas analógicos y métodos automatizados) existe la posibilidad de buscar una solución híbrida que nos permita utilizar el conocimiento, experticia y experiencia del experto junto con la sencillez, rapidez y replicabilidad del modelo de Charles-Edwards para determinar la temperatura media

mensual para todo un año. Por esto en esta investigación se analiza la alternativa que consiste en realizar una interpolación temporal con el método de Charles-Edwards utilizando como datos de entrada para la amplitud térmica mapas de los meses extremos (más cálido y más frío) trazados por un experto.

El modelo propuesto por Charles-Edwards ya ha sido validado en algunos países de América Latina, ejemplo de esto es el estudio realizado por Ortiz (2007) para estimar la temperatura media mensual en México. Específicamente en Chile, Díaz (2006) obtuvo resultados estadísticamente confiables utilizando este método para la estimación de la temperatura media mensual de las VIII, IX y X regiones.

No obstante, el método de Charles-Edwards es en sí un modelo general basado en correlatos, que si bien puede alimentarse con parámetros extremos cuya distribución espacial proviene de un trazado experto, no necesariamente está garantizado que se conserve el patrón original que refleja la causalidad que el experto ha identificado en un área.

La discusión respecto a la idoneidad de los datos climáticos y la tendencia a equiparar realismo con resolución es una discusión cada vez más recurrente, en vista que éstos son cada día más utilizados en la generación de conocimiento científico, en la toma de decisiones y en otros aspectos relevantes. Muchos de los modelos matemáticos y estadísticos utilizados fueron diseñados para resoluciones espaciales mayores a 1 Km, en las cuales los factores particulares del terreno no poseen una gran relevancia en la obtención de los resultados. Sin embargo, en la actualidad se avanza cada vez más en la generación de mapas de una mayor resolución espacial (menos de 1 Km). A ésta escala las características particulares del terreno cobran mayor relevancia debido a que su efecto sobre la variable pasa a ser significativo producto del detalle que se busca alcanzar. En general la cobertura de estaciones meteorológicas es insuficiente y no permite dar cuenta de la variación que existe a una resolución de 1 km o menos, dado que la distancia entre ellas es mucho mayor que la resolución requerida (Daly, 2006).

Es por esto que se hace necesario, junto con establecer alternativas al trazado experto, determinar la idoneidad de estas. En el caso de utilizar el modelo de Charles-Edwards, como interpolador temporal a partir de mapas de temperaturas extremas, con el fin de no tener que recurrir a un experto para obtener las cartas de temperatura media mensual para todos los meses del año, es necesario saber si éste es capaz de preservar el realismo del trazado experto a una resolución más detallada.

En base a estos antecedentes, la presente memoria plantea los siguientes objetivos:

Objetivo General

Determinar si el modelo de Charles-Edwards preserva el comportamiento espacio-temporal de la temperatura media mensual inferido por el experto.

Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento espacio-temporal de la temperatura media mensual mediante el modelo de Charles-Edwards.
- Establecer el grado de concordancia entre la interpolación realizada mediante el método de Charles-Edwards y los mapas analógicos trazados por el experto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes del Área de Estudio

El estudio se realizó en la Región del Maule, Chile, ubicada aproximadamente entre los 34°41' y los 36°33' latitud sur y entre los 70°18' y 72°45' longitud oeste (Figura 1). La Región del Maule, tiene un clima principalmente determinado por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, el cual se caracteriza por ser una zona de altas presiones; la influencia marina y el relieve, especialmente por la cordillera de la Costa y la cordillera de los Andes. Según Di Castri y Hajek (1976), climáticamente pertenece a la Región Mediterránea, con una estación seca de 4 a 5 meses.

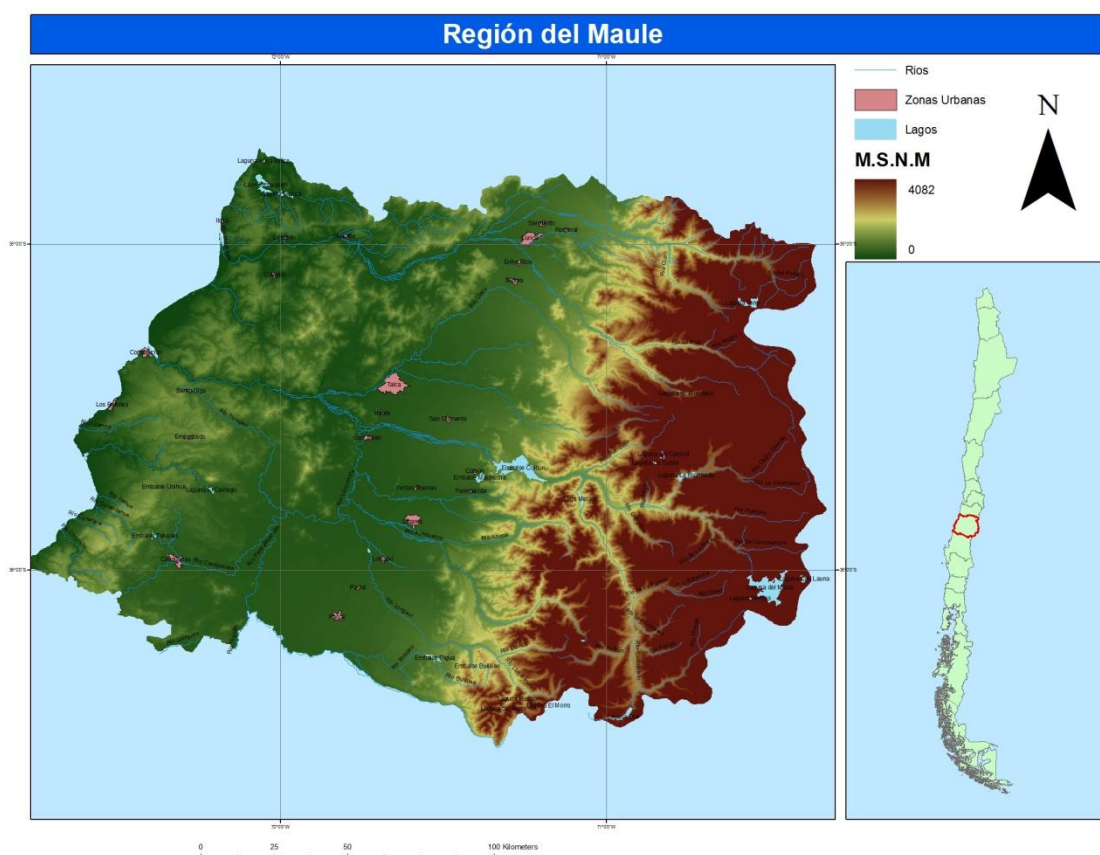


Figura 1. Cartografía base del área de estudio (Fuente: Elaboración propia en base a SINIA, s.a.).

Las precipitaciones se concentran en los meses de invierno y son casi exclusivamente del tipo frontal. Los niveles anuales de precipitación van desde los 800 mm en la costa hasta los 2.500 mm en la alta cordillera. Las temperaturas medias anuales varían entre los 13 y 15 °C. En la depresión intermedia se encuentran los valores de temperatura media mensual más altos y en la franja costera y cordillerana los más bajos.

Presenta una geomorfología típica de la zona central de Chile,

con la presencia marcada de las cuatro macroformas del relieve chileno: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes (Errázuriz *et al.*, 1992). La cordillera de los Andes en Chile va disminuyendo su altitud en dirección nortesur, presentando en esta zona una altura promedio de 3.500 m.s.n.m. Por otra parte, la Cordillera de la Costa tiene un promedio de altura de 800 m.s.n.m. La depresión intermedia en esta región es menos accidentada y más amplia que la que se observa en la mayoría de las regiones de la zona central.

Materiales

Para llevar a cabo esta investigación se utilizaron mapas de la temperatura máxima y mínima de los meses de enero, marzo, julio y septiembre, los cuales fueron trazados por un experto a una escala de 1:250.000, para la región del Maule (ver anexo I). Estos mapas fueron trazados para el proyecto “Puesta en valor de terrenos fiscales y suelos marginales mediante el desarrollo de cultivos energéticos.” (CORFO-InnovaChile: 2009-5726/09CN14-5726) y facilitados para esta investigación.

También fueron necesarios una cobertura con los límites administrativos de la región del Maule, proyección UTM 19 sur, perteneciente al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA); un modelo digital de elevación (DEM) con una resolución de 90 metros (Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>); y una cobertura con el vector que describe la línea de la costa (Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/>). Para el procesamiento de la información se utilizó un software especializado en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Métodos

Para determinar si el modelo propuesto por Charles-Edwards preserva el comportamiento espacio temporal de la variable temperatura media mensual de la región del Maule inferido por el experto, cuando dicho modelo se utiliza para interpolar el comportamiento de la temperatura media mensual a partir de los mapas trazados por el experto para los meses extremos de enero y julio, se realizaron los siguientes pasos:

En primer lugar se interpolaron las temperaturas medias mensuales para el área de estudio, utilizando el modelo propuesto por Charles-Edwards. Para dicho proceso se utilizaron, como datos de entrada, los mapas de temperatura media mensual de los meses de enero y julio trazados por el experto, correspondiente a los meses extremos para la variable.

Posteriormente se procedió a determinar el grado de concordancia entre los mapas obtenidos con el procedimiento anteriormente nombrado y los mapas trazado por el experto para algunos meses intermedios y los meses extremos. Para esto se realizaron análisis

cuantitativos, correspondientes a la determinación del error cuadrático medio y un análisis de similitud cartográfica; además de un análisis cualitativo basado en la obtención de muestras a través de transectos utilizando criterio experto.

Generación de los mapas de temperatura media mensual mediante la utilización del modelo propuesto por Charles-Edwards.

A continuación se presenta el procedimiento que se siguió para obtener la temperatura media mensual a partir del modelo propuesto por Charles-Edwards. En primer lugar se hace una breve descripción del modelo, seguido de su aplicación para obtener las temperaturas medias diarias a lo largo de un año, para finalizar con la elaboración de las temperaturas medias mensuales.

Modelo basado en las relaciones aproximadas obtenidas por Charles-Edwards

El flujo de energía radiante incidente, tanto a lo largo de un día como a lo largo del año, sigue un comportamiento senoidal, al igual que la temperatura del aire. Esta última con un mínimo alrededor del amanecer y un máximo que ocurre unas 2 a 3 horas después del máximo de radiación. Este retraso se debe, principalmente, al balance entre la energía que llega a la superficie y la que sale. Durante las primeras horas del día la energía radiada por el sol es absorbida por la superficie terrestre, la cual una vez calentada comienza un flujo sensible a la atmósfera aumentando la temperatura del aire. Además, otros factores (como por ejemplo la advección) pueden contribuir a la elevación de la temperatura de la tarde.

La evolución anual de las temperaturas máxima y mínima del aire sigue un patrón muy similar al de la evolución diaria. Por término medio, el mínimo y el máximo de temperatura ocurren con cierto retraso respecto al mínimo y al máximo de radiación, respectivamente. Las razones de este desfase entre las ondas de temperatura y radiación son similares a las descritas para la evolución diaria. Durante la primavera una parte de la radiación se emplea en calentar el suelo. Conforme la temperatura del suelo se eleva con respecto a la del ambiente, quedará más energía disponible para transformarse en calor sensible y viceversa para el mínimo de temperatura en invierno (Villalobos *et al.*, 2002).

Charles-Edwards en 1982 describen esta variación estacional de la temperatura media del aire, lo que permite predecir, aproximadamente, el valor de la variable en un tiempo determinado. Pero además pretendían poder estimar este valor en un lugar cualquiera determinado, para lo cual incorporaron al análisis factores geográficos como la latitud. Lo que ellos encontraron fue que el valor medio anual del promedio diario de la temperatura del aire decrece aproximadamente de forma lineal a medida que aumenta la latitud, al igual que la amplitud relativa del promedio diario de la temperatura del aire.

De esta forma, basados en las relaciones aproximadas obtenidas en su estudio, Charles-Edwards consideraron que la variación estacional de esta variable es dependiente del día juliano (DJ) y de la latitud (LAT , grados sexagesimales), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_a = TMA + TD \cdot \text{SENO} \left[\frac{2\pi \cdot \left(Dj + Z - \left(\frac{Lat}{2} \right) \right)}{365} \right] \quad \text{Ecuación 1.}$$

El modelo estima la temperatura media diaria (T_a , °C) utilizando el día juliano (Dj), el día correspondiente al equinoccio de otoño (Z), la amplitud de la onda anual de temperatura (TD , °C), la temperatura media anual (TMA , °C) y la latitud (LAT).

Donde $Z = 101$ para el hemisferio sur (Villalobos *et al.*, 2002).

Generación de mapas de temperatura media mensual

Para la generación de los mapas de temperatura mensual se procedió en primer lugar, a obtener los mapas de la temperatura media diaria para los 365 días de año en el área de estudio. Para esto se utilizó el modelo propuesto por Charles-Edwards y los mapas de temperatura media anual (TMA), amplitud térmica anual (TD) y latitud (LAT); obtenidos a partir de los materiales mencionados anteriormente.

Dado el gran volumen de información a procesar y la gran cantidad de cálculos, se realizó una programación del modelo en lenguaje "Visual Basic" a través de una "Macro", en el "software Excel de Microsoft", con el fin de automatizar el procedimiento (Ver apéndice I).

Este programa aplicó el modelo y generó los mapas de temperatura media diaria para el área de estudio, en orden correlativo del 1 al 365. Posteriormente, mediante la realización de otro programa en "Visual Basic de Excel", se realizó el cálculo de la temperatura media mensual para los 12 meses del año (Ver apéndice I). El programa necesitó como datos de entrada el nombre del mes a calcular y el día juliano de inicio y termino de este, para identificar que mapas de temperatura media diaria debían ser utilizados en el procedimiento y colocar automáticamente el nombre del mes al mapa obtenido. Los mapas fueron procesado en formato "raster", escala 1:250.000, coordenadas geográficas Datum WGS84.

Pre procesamiento de la información

Para llevar a cabo los procedimientos anteriores se debió realizar una serie de pre procesamiento a los materiales requeridos por el estudio, que consistieron en la elaboración y estandarización de los mapas utilizados en la ecuación 1. A continuación se presentan los procedimientos realizados.

Pre procesamiento de los mapas trazados por el experto

Para la elaboración de este estudio se contó con la colaboración de un experto¹, quien en base a su conocimiento, experiencia y capacidades, y utilizando una serie de factores fisiográficos que influyen sobre la temperatura como la altitud, proximidad al océano, latitud, longitud y topografía realizó el diseño de las cartas de isotermas.

El experto trazó las isotermas, máximas y mínimas de los meses de enero y julio para la Región del Maule, utilizando como referencia los valores de las estaciones seleccionadas para la variable temperatura media de los meses considerados, la hipsometría y topografía del área de estudio. El trazado se realizó a escala 1:250.000. Adicionalmente, el experto trazó las isotermas máximas y mínimas de los meses de marzo, mayo, septiembre y noviembre.

Las isotermas, previo a ser utilizadas en este estudio, fueron sometidas a una serie de procedimientos con el fin de generar un mapa continuo de la variable. El procedimiento incluyó la selección de puntos estratégicos por parte del experto y una posterior interpolación de estos mediante el método del Vecino Natural ("Natural Neighbor"). El algoritmo utilizado por la herramienta de interpolación de Vecino Natural halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. Sus propiedades básicas son que es local, utiliza sólo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que los datos interpolados estarán dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no estén ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada (Sibson, 1981).

Dado que los mapas de temperatura obtenidos de la interpolación del trazado de las isotermas se encontraba en formato "GRID" se debió hacer una transformación de estas a formato "raster" (.rst), que fuese compatible con el "software" IDRISI. Posteriormente debido a que los mapas trazados por el experto no poseían todos la misma cantidades de filas y columnas fue necesario redimensionarlos para compatibilizarlos entre si y permitir generar operaciones entre ellos. Todas las imágenes se trabajaron en coordenadas geográficas Datum WGS84. De esta forma se obtuvieron los mapas de temperaturas máximas y mínimas para los meses de enero, mayo, julio, septiembre y noviembre.

Obtención de parámetros de entrada para el modelo propuesto por Charles-Edwards

Posteriormente, una vez obtenidos los mapas de experto, utilizando un "software" especializado en SIG, se procedió a la obtención de la información necesaria requerida como entrada para el método propuesto por Charles- Edwards.

¹ Juan Manuel Uribe, Ingeniero Agrónomo Universidad de Chile

La información requerida corresponde a la Temperatura media anual (TMA, °C), la amplitud de la onda anual de temperatura (TD, °C) y el coeficiente Z, correspondiente al día juliano en que ocurre el equinoccio de otoño. Para los primeros dos casos se utilizó la temperatura media mensual del mes más cálido y el más frío para la obtención de dichos parámetros (TMM y TD). La temperatura media mensual se obtuvo del promedio de la temperatura máxima y la temperatura mínima para cada mes, según la siguiente ecuación.

$$TMM_i = \frac{Tmax_i + Tmin_i}{2} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

TMM_i, corresponde al mapa de temperatura media mensual para el mes i, en °C.

Tmax_i, corresponde al mapa de temperatura máxima del mes i, en °C.

Tmin_i, corresponde al mapa de temperatura mínima del mes i, en °C.

Una vez obtenidos los mapas de temperatura media para el mes más cálido y el mes más frío, correspondientes a enero y julio respectivamente, se procedió a la obtención de la temperatura media anual mediante el cálculo del promedio entre ambos meses.

A continuación, se obtuvo el coeficiente TD. Dado a que la amplitud de la onda anual de temperatura corresponde a la diferencia de temperatura existente entre el mes más cálido y el mes más frío, esta se obtuvo de la sustracción entre los mapas de la temperatura media mensual de enero y julio.

$$TD = TMM_{Enero} - TMM_{Julio} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Además de la obtención de estos mapas, también fue necesaria la elaboración de uno que mostrara la latitud en la que se encontraba cada pixel de la imagen y otro que mostrara la longitud, para lo cual se utilizaron las herramientas provistas por el "software" especializado en SIG.

Según Charles-Edwards (1982) el coeficiente Z se estima en 101 para el hemisferio sur. Sin embargo, según un estudio realizado en Chile (Díaz, 2006) se determinó que este valor no es lo suficientemente preciso, por lo que el autor, utilizando datos de estaciones meteorológicas, ajustó un modelo de regresión múltiple en el cual utilizó como variables explicativas los factores fisiográficos y topográficos correspondientes a la latitud, longitud, altitud y distancia a la línea de la costa. La ecuación obtenida es la siguiente y fue la utilizada para generar un mapa con el valor de Z para cada pixel del área de estudio.

$$\begin{aligned} Z = & 198,653 + 0,0806533 \cdot DL + 8,15612 \cdot 10^{-3} \cdot (LAT \cdot LON) \\ & + 2,59936 \cdot 10^{-4} \cdot (LON \cdot ALT) + 1,48772 \cdot 10^{-4} \\ & \cdot (ALT \cdot DL) + (-0,0239096) \cdot LON^2 \\ & + (-7,96328 \cdot 10^{-4}) \cdot DL^2 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

DL: Distancia a la línea de la costa (Km).

LAT: Latitud, en grados sexagesimales.

LON: Longitud, en grados sexagesimales.

ALT: Altitud (m.s.n.m)

El modelo de regresión obtenido por Díaz (2006) resultó ser significativo, al igual que cada uno de sus coeficientes ($P \leq 0,05$). El modelo explicó en un 81,55% la variación observada en los datos y el error estándar fue de un 1,287.

Finalmente todas las imágenes fueron ajustadas, de forma que tuviesen las mismas dimensiones y estructura, además de hacer más fácil su manejo al eliminar información irrelevante que se encuentra fuera de los límites del área de estudio, haciendo más rápido su procesamiento posterior.

Determinación del grado de concordancia entre la interpolación realizada mediante el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto.

Para determinar el grado de concordancia existente entre la interpolación realizada mediante el método propuesto por Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto se realizaron tres análisis diferentes: dos cuantitativos y uno cualitativo.

Los métodos cuantitativos utilizados correspondieron al error cuadrático medio y al análisis de similitud cartográfica. El primero permitió estimar cual es el error del valor de la variable calculada mediante el método propuesto por Charles-Edwards en relación al mapa trazado por el experto. El segundo método permitió visualizar de forma espacial en que sectores el modelo propuesto por Charles-Edwards se acerca más a la estimación realizada por el experto, dando cuenta del grado de concordancia espacial entre ambos métodos.

Finalmente se realizó un análisis cualitativo, el que consistió en la realización de transectos en los cuales se observó el comportamiento de la variable bajo determinadas condiciones en el mapa obtenido por el método propuesto por Charles-Edwards y el obtenido del trazado experto, para determinar si la interpolación lograba replicar el comportamiento inferido por el experto en condiciones determinadas.

Obtención del error de la estimación

Para calcular el error de la estimación realizada mediante el uso del método propuesto por Charles-Edwards, en relación al mapa obtenido del trazado experto, se utilizó el Error Medio Cuadrático (RMSE), expresado la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x' - x)^2}{n}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde x' indica el valor estimado, x el valor medido en terreno y n el tamaño de la muestra.

Para este caso se consideró el valor medido en terreno como el valor medido en el mapa dibujado por el experto. Esto debido a que el objetivo de esta investigación no es saber qué tanto se ajustan los mapas interpolados mediante el método de Charles-Edwards a la realidad empírica, sino más bien su grado de ajuste a el mapa trazado por el experto, bajo el supuesto de que este es la aproximación más cercana a la realidad.

Análisis de Similitud Cartográfica

Luego de conocer el error de la estimación se procedió a realizar un análisis espacial del grado de similitud que se consiguió entre los mapas obtenidos mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards y los obtenidos de los trazados dibujados por el experto.

Cuando se realiza una comparación entre mapas lo más sencillo y menos costoso es hacer un simple análisis visual (Chuvieco, 2002), en el cual se analiza observando de un mapa a otro tratando de hacer una valoración de la similitud entre ellos, basados en la distribución de colores y brillo, entre otros criterios, en cada zona (Berry, 2002). Sin embargo, esto no permite identificar que tan similares o diferentes es un mapa de otro, ni en qué grado. Por esta razón se optó por realizar un análisis de similitud cartográfica para analizar espacialmente el grado de similitud entre los mapas, permitiendo saber en qué grado y en qué zonas el modelo propuesto por Charles-Edwards consiguió acercarse más a los mapas obtenidos de los trazados dibujados por el experto

Mientras el análisis visual se basa en la trama de colores del mapa, el análisis de similitud cartográfica utiliza los valores cartográficos verdaderos contenidos en las celdas de los mapas (Berry, 2002). Para entender cómo funciona el análisis de similitud cartográfica es necesario entender que los datos cartográficos pueden ser expresados en el espacio cartográfico y en el espacio de datos.

El espacio geográfico utiliza coordenadas, como por ejemplo latitud y longitud, para localizar los elementos del mundo real. Por otra parte, el espacio de datos tiene relación con el valor numérico contenido en cada pixel de la imagen (Berry, 2002). Se puede observar un ejemplo de espacio de datos en la figura 2, donde se tienen tres mapas referentes a la distribución de fosforo (P), potasio (K) y nitrógeno (N), en los cuales se tomó el valor de una celda ubicada en un mismo punto cartográfico en los 3 mapas, obteniendo los niveles de P, K y N para un mismo punto del espacio. Estos valores se pueden tomar como si fueran coordenadas en un plano cartesiano tridimensional, en el cual sus ejes corresponden a los niveles de P, K y N y ubicar este punto en el espacio de datos como se muestra en la figura 2.

Si se hace esto con todas las celdas de los mapas se obtiene una serie de puntos al interior de un espacio tridimensional similar a una caja. En este ejemplo se destacan dos puntos. El punto más cercano al observador (por eso se ve más grande) y el punto de comparación.

En este caso el punto más cercano al observador es a la vez el más distante al punto de comparación en este espacio de datos, por lo que esta distancia será considerada como el valor de máxima diferencia, por ende se le asignara el valor 0 (0% de similaridad). Por el contrario, si existe otro punto con exactamente los mismos niveles de P, K y N éste se ubicará en el mismo lugar que el punto de comparación, por lo que su distancia será 0, correspondiente a un 100% de similaridad.

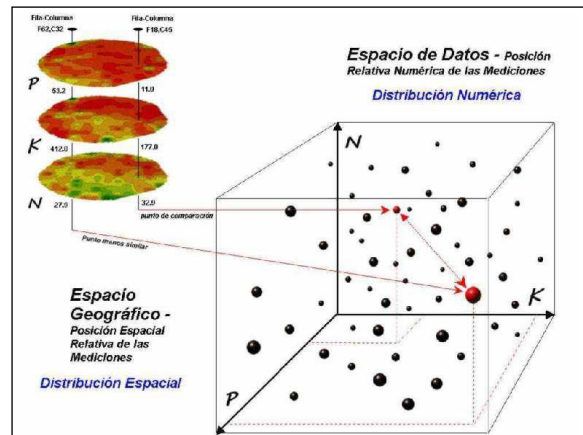


Figura 2. Relación conceptual entre el espacio de datos y el espacio geográfico. (Fuente: GeoTech Conference on Geographic Information Systems, Toronto, Ontario, Canada, April 8-11, 2002. J.K. Berry).

En el caso de esta investigación la comparación se realizó entre dos mapas: El mapa dibujado por el experto y el interpolado mediante el método de Charles-Edwards. Por lo que el espacio de datos es bidimensional.

Como el objetivo es comparar el mapa interpolado mediante el método de Charles-Edwards con el dibujado con el experto, se comparó cada celda del mapa interpolado con Charles-Edwards con la misma celda del dibujado por el experto. Si ambos mapas fueran idénticos se obtendrá, en el plano bidimensional, una serie de puntos ubicados en una línea con una pendiente de 45° , que pasa por el origen y divide el plano en dos partes iguales (ver figura 3). Si el valor de la celda en el mapa interpolado por el método de Charles-Edwards es distinto al del mapa dibujado por el experto el punto se ubicará por encima o debajo de la línea mencionada anteriormente.

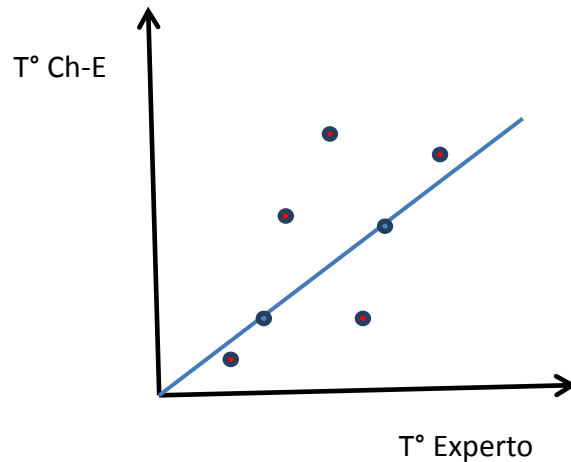


Figura 3. Relación conceptual del espacio de datos entre los mapas obtenidos mediante el método propuesto por Charles-Edwards y trazado experto (Fuente: Elaboración propia).

La máxima distancia entre el punto ideal (celda con el mismo valor en ambos mapas) y el punto estimado se consideró como el 0% de similaridad, mientras, si el punto se ubica sobre la línea que describen los puntos de ser idénticos los valores de la celda en ambos mapas, su distancia será 0 y por lo tanto se le asignó el valor de 100% de similaridad.

Complementario al análisis de similaridad cartográfica, con el fin de analizar solamente la semejanza en la distribución de la variable entre los mapas obtenidos del trazado por el experto y los mapas obtenidos del modelo propuesto por Charles-Edwards, se realizó una comparación entre los valores relativos de dichos mapas.

Este análisis consistió en convertir los valores de la temperatura media mensual absolutos a valores relativos entre 0 y 1, para observar la distribución de las temperaturas. Posteriormente, se realizó un análisis de similaridad entre los mapas obtenidos del trazado experto y los mapas obtenidos del modelo propuesto por Charles-Edwards que se presenta en un mapa con valores entre 0 y 1. Para obtener este mapa se realizó una substracción entre los mapas a analizar y se le asignó el valor 1 a aquellos pixeles con valores relativos idénticos (que por ende en la substracción daban valor 0) y valor 0 a aquellos pixeles con valores relativos completamente opuestos (que por ende en la substracción daban valor 1). De esta forma se logró aislar la componente distribución y así determinar que tanto conserva el modelo el patrón espacial inferido por el experto.

Análisis cualitativo de la concordancia entre la interpolación realizada por el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto.

Además se realizó un análisis cualitativo basado en criterio experto, que permitió contrastar las teorías respecto al comportamiento que debiese presentar la variable y el descrito por los modelos. En este análisis se establecieron trazados hipsométricos que recogen la

variabilidad topoclimática del comportamiento de la temperatura media mensual en zonas que representan las condiciones topográficas asociadas a la costa, el valle central y la precordillera.

Para esto el experto realizó una serie de trazados, de forma que representaran diferentes escenarios de interés en los cuales él conociese el comportamiento esperado de la variable. Posteriormente se analizó si el comportamiento observado en los diferentes trazados realizados en el área de estudio eran los esperados, considerando las hipótesis y el conocimiento acumulado respecto a cómo debiera comportarse la variable en la realidad.

Posteriormente se incorporaron los resultados obtenidos de ambos análisis para comparar los modelos y establecer si la estimación realizada con el modelo propuesto por Charles-Edwards preserva el comportamiento espacio-temporal de la temperatura media mensual inferido por el experto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pre Procesamiento de la información

A continuación se presentan y discuten los resultados correspondientes a la preparación y procesamiento previo de la información utilizada en el modelo propuesto por Charles-Edwards, para la obtención de los mapas de temperatura media diaria.

En primer lugar se presentaran los resultados del coeficiente Z.

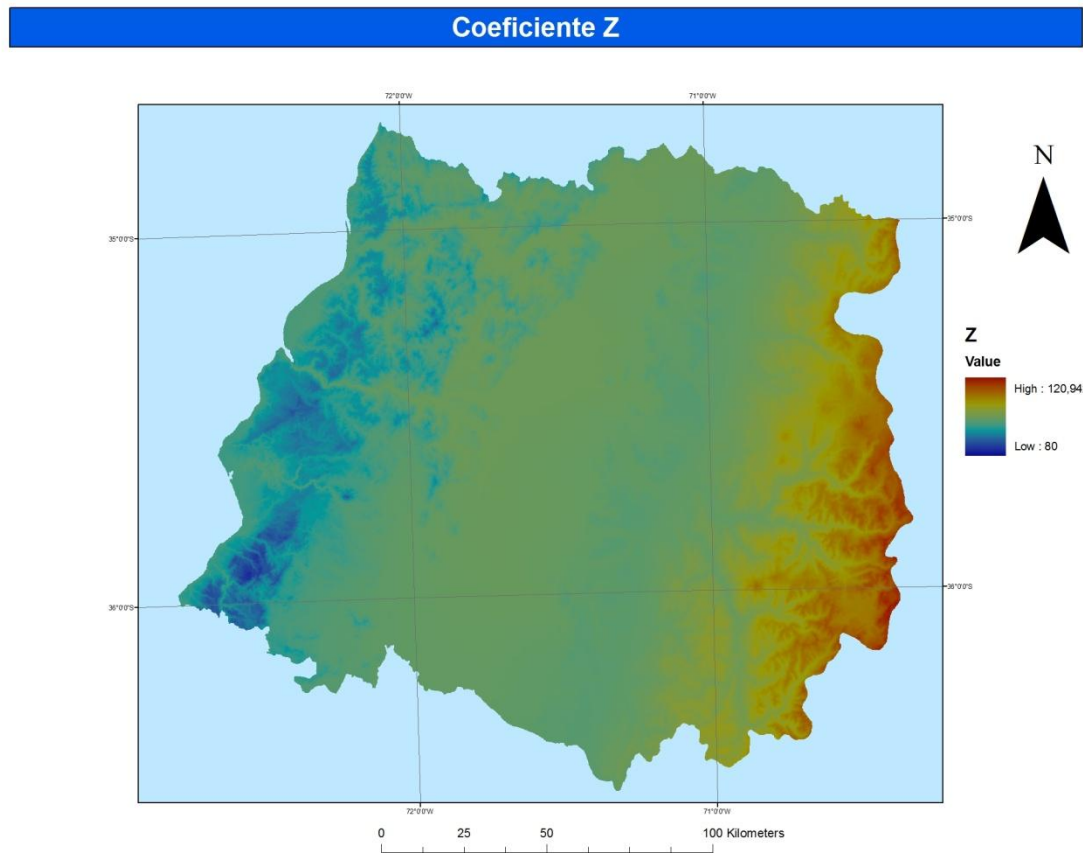


Figura 4. Distribución espacial del coeficiente Z (Fuente: Elaboración propia).

En la figura anterior se puede observar el comportamiento espacial del coeficiente Z, obtenido mediante el uso de la ecuación 3, para la cual se requirió generar mapas de latitud, longitud y distancia a la costa. A continuación se presenta un cuadro (cuadro 1) con los

principales datos estadísticos del área de estudio y se discutirán los resultados en relación al coeficiente Z.

Cuadro 1. Estadísticas del coeficiente Z.

Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Estándar
81,333	120,941	97,395	4,971

Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio obtenido del coeficiente Z para la región del Maule corresponde a 97,395. Según Charles y Edwards el coeficiente Z corresponde al día del año en que sucede el equinoccio de otoño, sugiriendo un valor aproximado del día 101 (11 de Abril) para el hemisferio sur. Sin embargo, el equinoccio de otoño ocurre en el hemisferio sur el día 21 de marzo aproximadamente, el que corresponde al día 80 en orden correlativo de los 365 días del año.

En cuanto a la distribución espacial del coeficiente Z se puede observar que los valores más altos se encuentran en las zonas más altas de la cordillera de los Andes, con un máximo de 120,941 y disminuye a medida que avanzamos hacia el oeste, principalmente en la cordillera de la costa, llegando a un mínimo de 81,333. Estos valores se encuentran dentro del rango esperado, encontrándose en su mayoría dentro del rango del día del equinoccio de otoño y el valor estimado por Charles y Edwards.

Si bien en la ecuación original el parámetro Z es una constante, para efectos de esta investigación se decidió incorporarlo como una variable, de acuerdo a lo realizado por Díaz (2006), para incorporar una mayor variabilidad derivada de los factores fisiográficos utilizados en la ecuación 4. Sin embargo, en esta investigación no se evalúa el efecto de esta modificación respecto a la ecuación original planteada por Charles-Edwards, por lo que no se puede determinar el nivel de influencia que tuvo en los resultados obtenidos. La decisión de optar por esta modificación se basó en que existía una investigación previa que incluía el área de estudio, en la cual ya se había evaluado este modelo. Sin embargo, cabe destacar que existen otras adaptaciones al modelo que se han realizado en otras partes del mundo las cuales podrían ser sujeto de evaluación para la realidad de esta y otras regiones de Chile

Otra de las variables calculadas, que se utiliza como dato de entrada para el modelo de Charles-Edwards, es la temperatura media anual (TMA). Esta se obtuvo a partir de los mapas trazados por el experto de temperaturas máximas y mínimas de los meses de enero y julio. En la figura 5 se observa la distribución espacial de esta variable en el área de estudio.

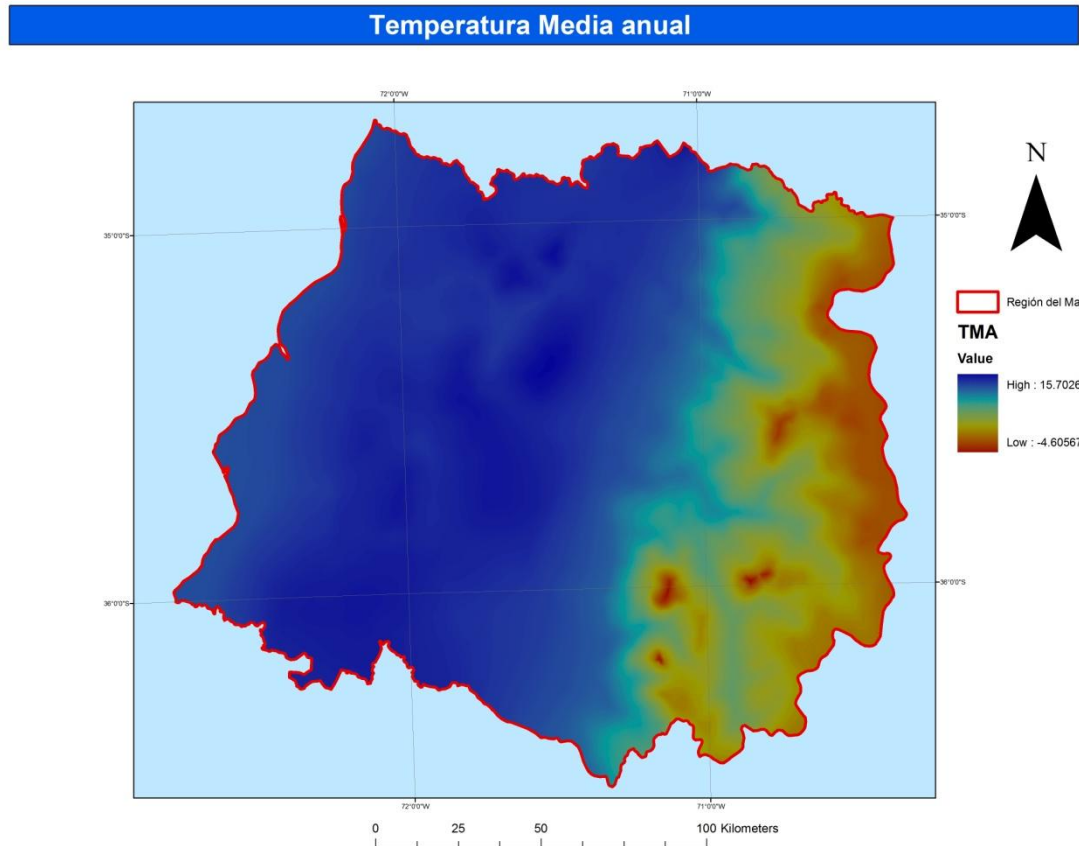


Figura 5. Mapa de temperatura media anual obtenida a partir del trazado experto (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede apreciar, el comportamiento de la temperatura es el esperado, desde el punto de vista de su distribución espacial, presentando las temperaturas más altas en la depresión intermedia y disminuyendo hacia la cordillera de los Andes. Esto se explica debido a que el factor predominante en la variación de la temperatura al interior del país, de este a oeste, es la altitud (Errazuriz *et al.*, 1992).

Cuadro 2. Estadísticas de la temperatura media anual.

Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	Desv. Estándar (°C)
-4,605	15,702	10,402	5,141

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en el cuadro 2 el promedio de la temperatura en el área de estudio alcanza una temperatura de 10,4 °C, con una mínima de -4,6 °C y una máxima de 15,7 °C. Se puede apreciar una gran variabilidad, lo que se refleja en que la desviación estándar alcanza los 5,1 °C, esto principalmente a la gran diferencia entre los valores presentes en la depresión intermedia y la cordillera de los Andes.

En cuanto a la amplitud térmica (TD) que se obtuvo de la diferencia entre los mapas de temperatura media de julio y enero, calculados a partir de los trazados del experto, se aprecia que la mayor amplitud se encuentra en las zonas de menor altitud en el valle central y en las quebradas de la cordillera de los Andes (Figura 6). En cuanto a la zona costera y la cordillera de los Andes, la diferencia entre las temperaturas medias de los meses extremos es menor, este fenómeno es bien conocido y ha sido descrito por Sánchez y Morales (1990), Castellvi y Castillo (2001) y Errázuriz *et al.* (1992) entre otros, debido a la influencia de la costa y las características de continentalidad hacia el interior.

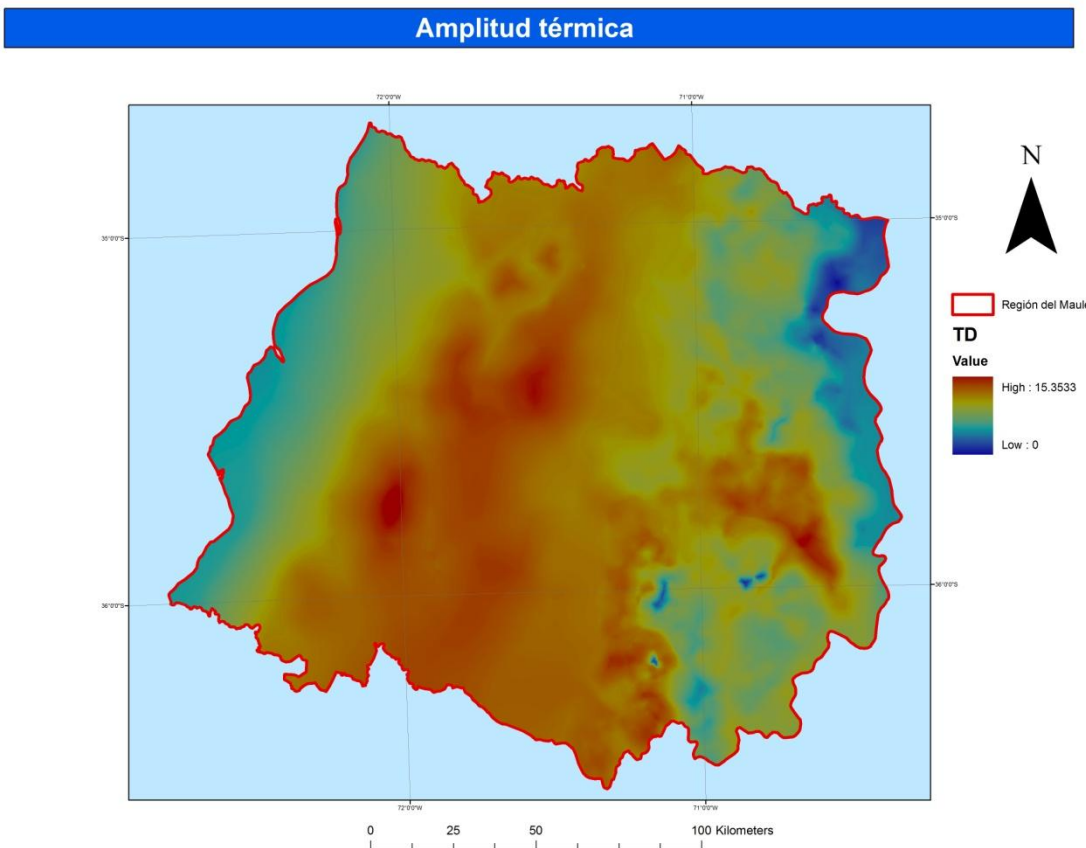


Figura 6. Distribución espacial de la amplitud térmica para el área de estudio (Fuente: Elaboración propia).

La diferencia de temperatura entre los meses más cálidos y más fríos depende de la latitud y la cercanía al océano, siendo mayor en latitudes más elevadas y menor entre más cerca se esté de los océanos (o cuerpos de agua en general). Este último fenómeno es el que se puede observar en la figura, en donde se aprecia una baja amplitud térmica en la zona costera y más alta al interior, esto se debe principalmente al efecto moderador del mar, ya que el calor específico, la penetración del calor y el calor latente de evaporación son elevados (Castellvi y Castillo, 2001). Otro factor que afecta la amplitud térmica es la altura, lo que se puede apreciar en las zonas más altas de la cordillera de los Andes, donde las

temperaturas suelen variar pocos grados a lo largo del año, encontrándose en estos lugares la menor amplitud térmica en el área de estudio con 0,05°C de oscilación (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Estadísticas de la amplitud térmica.

Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	Desv. Estándar (°C)
0,051	15,353	9,663	2,596

Fuente: Elaboración propia

Generación de los mapas de temperatura media mensual mediante la utilización del modelo propuesto por Charles-Edwards

A continuación se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de la información obtenida anteriormente para la elaboración de mapas de temperatura media mensual para la Región del Maule.

Modelo basado en las relaciones aproximadas obtenidas por Charles-Edwards

Con los mapas de temperatura media anual, amplitud térmica, latitud y el coeficiente Z se estimó, utilizando el modelo propuesto por Charles-Edwards (Ecuación 1), la temperatura media diaria para todo el año. De este procedimiento se obtuvieron 365 imágenes que corresponden a cada uno de los 365 días del año, desde el 1 de enero (día juliano 1) hasta el 31 de diciembre (día juliano 365), de los cuales se muestran a continuación los del día 15 (15 de enero), 74 (15 de marzo), 196 (15 de julio) y 258 (15 de septiembre) a modo de ejemplo.

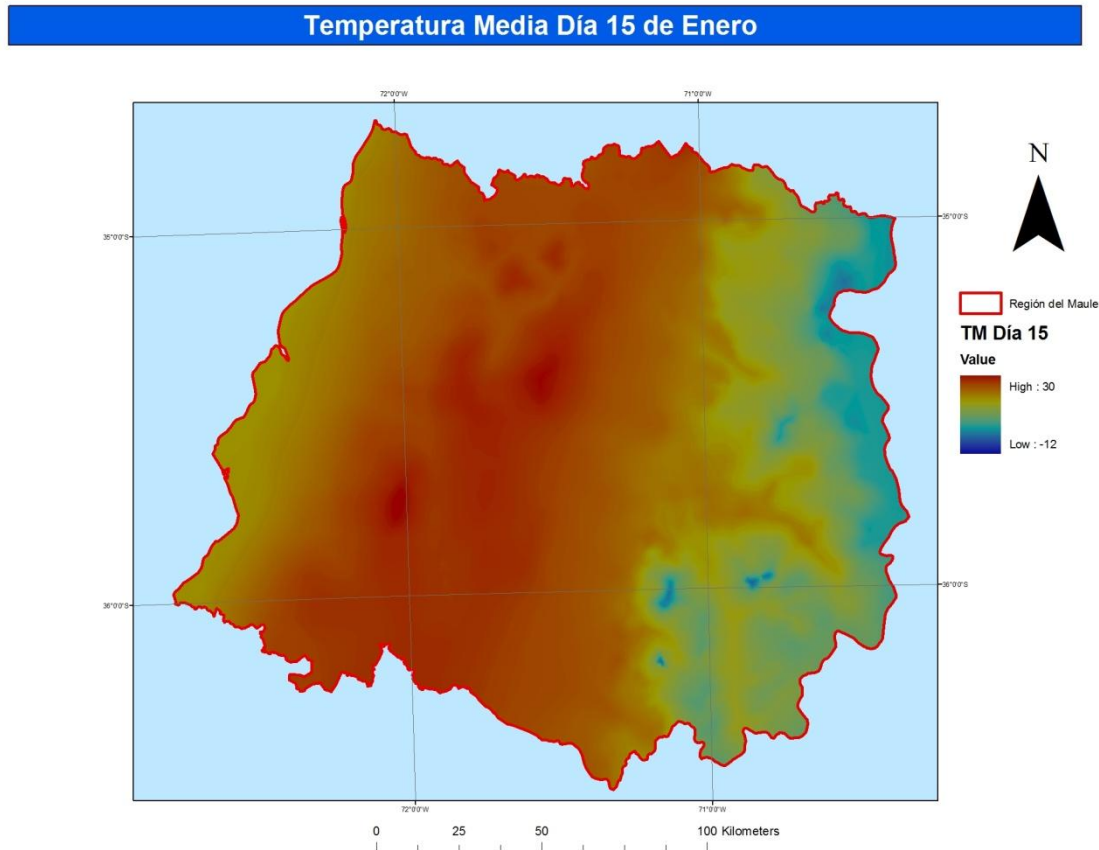


Figura 7. Temperatura media diaria para el día 15 de enero estimada mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

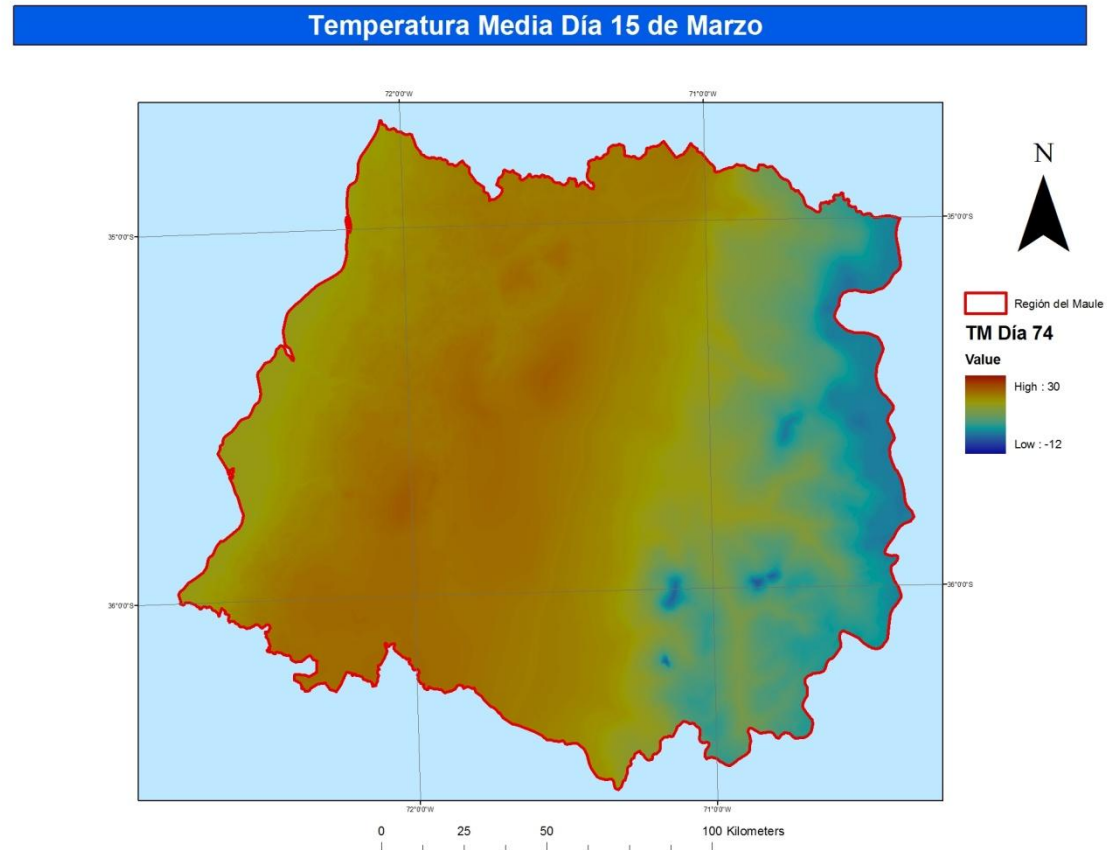


Figura 8. Temperatura media diaria para el día 15 de marzo estimada mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

En las imágenes anteriores podemos observar el comportamiento de la temperatura para el día 15 del mes de enero y de marzo (Figuras 7 y 8 respectivamente). En ambos mapas se observa una temperatura mínima muy similar (Ver cuadro 4), ubicándose esta en los sectores más altos de la cordillera de los Andes. En cuanto al comportamiento espacial podemos apreciar que existe en la figura del mes de enero, una clara concentración de las temperaturas más altas en la depresión intermedia, mientras en la Figura del mes de marzo la diferencia entre el sector costero y la depresión intermedia es menor producto del enfriamiento de la depresión intermedia.

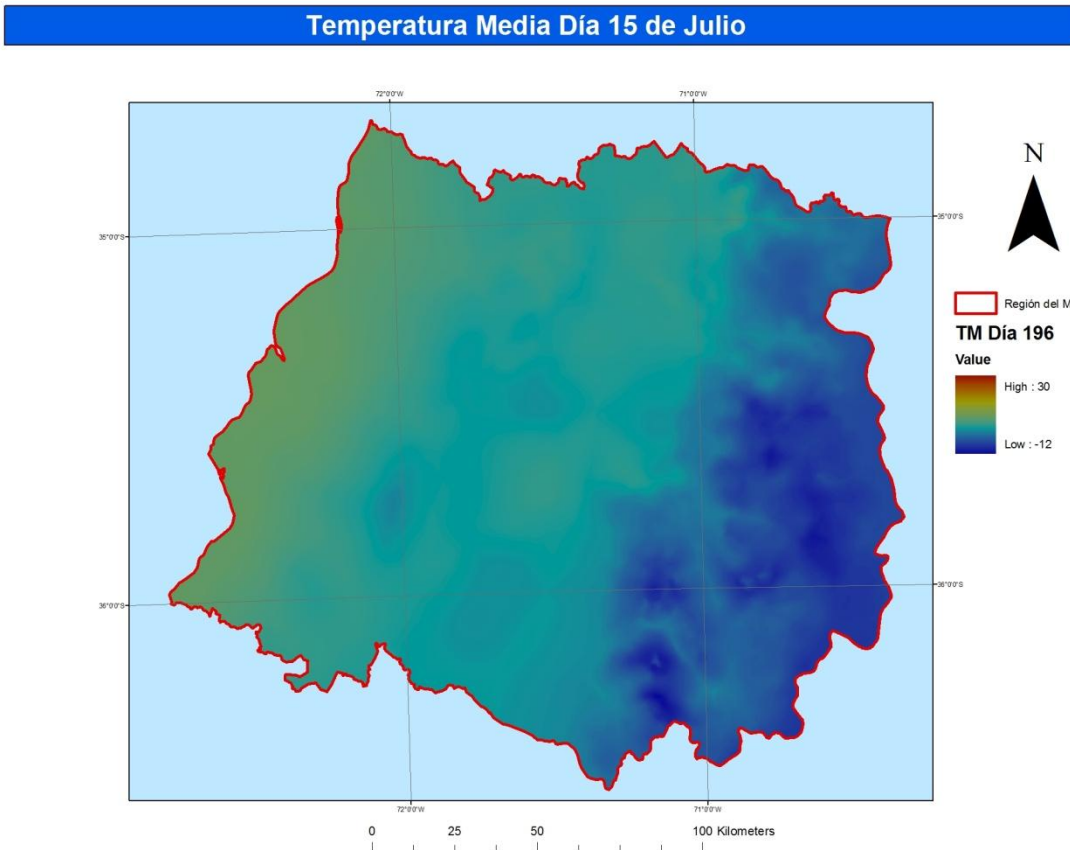


Figura 9. Temperatura media diaria para el día 15 de julio estimada mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

En lo que respecta a los días 15 de julio y 15 de septiembre, el comportamiento de la variable presenta la misma distribución espacial que para los casos anteriores, con las temperaturas más bajas en la cordillera de los Andes y las mayores en la depresión intermedia. La mayor variabilidad la encontramos en la imagen correspondiente a enero, con una desviación estándar de 6,9 °C (Ver cuadro 4), principalmente por el calentamiento de los valles y las bajas temperaturas en las altas cumbres de la cordillera de los Andes.

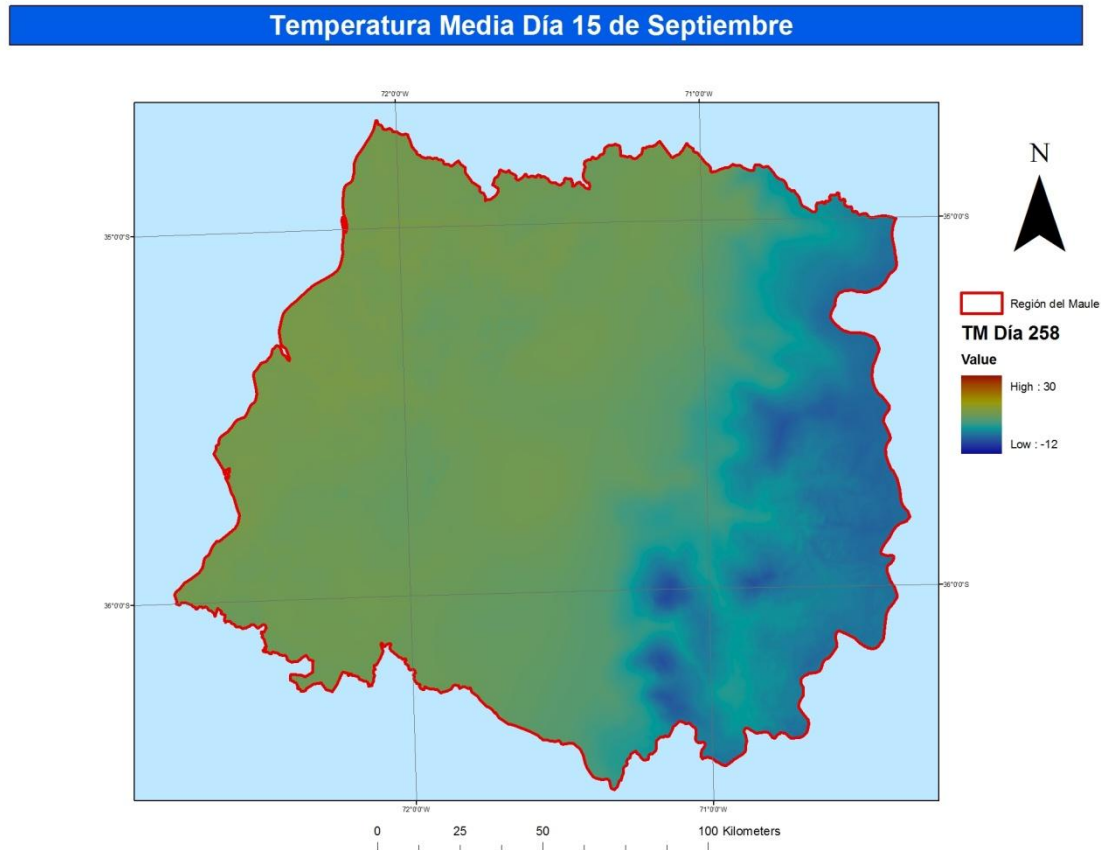


Figura 10. Temperatura media diaria para el día 15 de septiembre estimada mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

Cuadro 4. Estadísticas de la temperatura media diaria para los días 15, 74, 196 y 258.

Día	T° Mínimo (°C)	T° Máximo (°C)	T° Promedio (°C)	Desv. Estándar (°C)
15	-3,75	30,57	20,02	6,93
74	-4,35	22,97	15,04	6,31
196	-12,06	8,03	0,76	4,31
258	-5,55	10,67	5,97	4,16

Fuente: Elaboración propia

En estas imágenes se puede apreciar claramente la evolución temporal del comportamiento de la variable en las distintas épocas del año. En las zonas costeras se aprecia mayor estabilidad, la cual se refleja en el hecho de que en la imagen correspondiente a enero de esta zona posea una temperatura menor a la del valle, mientras a medida que se acerca al mes de julio es el valle el que presenta una temperatura menor a la de la costa, lo que se condice con lo analizado en la amplitud térmica, la cual es mayor en el valle producto de su

continentalidad y menor en la costa debido al efecto moderador del océano (Castellvi y Castillo, 2001).

La elaboración de estos mapas se realizó mediante la programación del modelo propuesto por Charles-Edwards a través de una “macros” en el “software Excel de Microsoft”. Esta programación se encuentra en el apéndice I.

Generación de mapas de temperatura media mensual

A partir de los mapas de temperatura media diaria, presentados en el apartado anterior, se procedió al cálculo de las temperaturas medias mensuales para los 12 meses del año (ver apéndice II). A continuación se presentan los mapas de temperatura media mensual de los meses de enero, marzo, julio y septiembre.

Utilizando los mapas de la temperatura media diaria de los días 1 al 31 se obtuvo la temperatura media mensual para el mes de enero, la cual se presenta en la figura 11. En este mapa se puede observar la distribución espacial típica de la temperatura en esta región con temperaturas estables en la costa, mayores temperaturas en el valle y una disminución importante a medida que se adentra en la cordillera de los Andes (Errázuriz *et al.*, 1992), con una temperatura máxima de 30°C y una mínima de -4°C respectivamente, el promedio de la temperatura en este mapa es de 20°C (Ver cuadro 5).

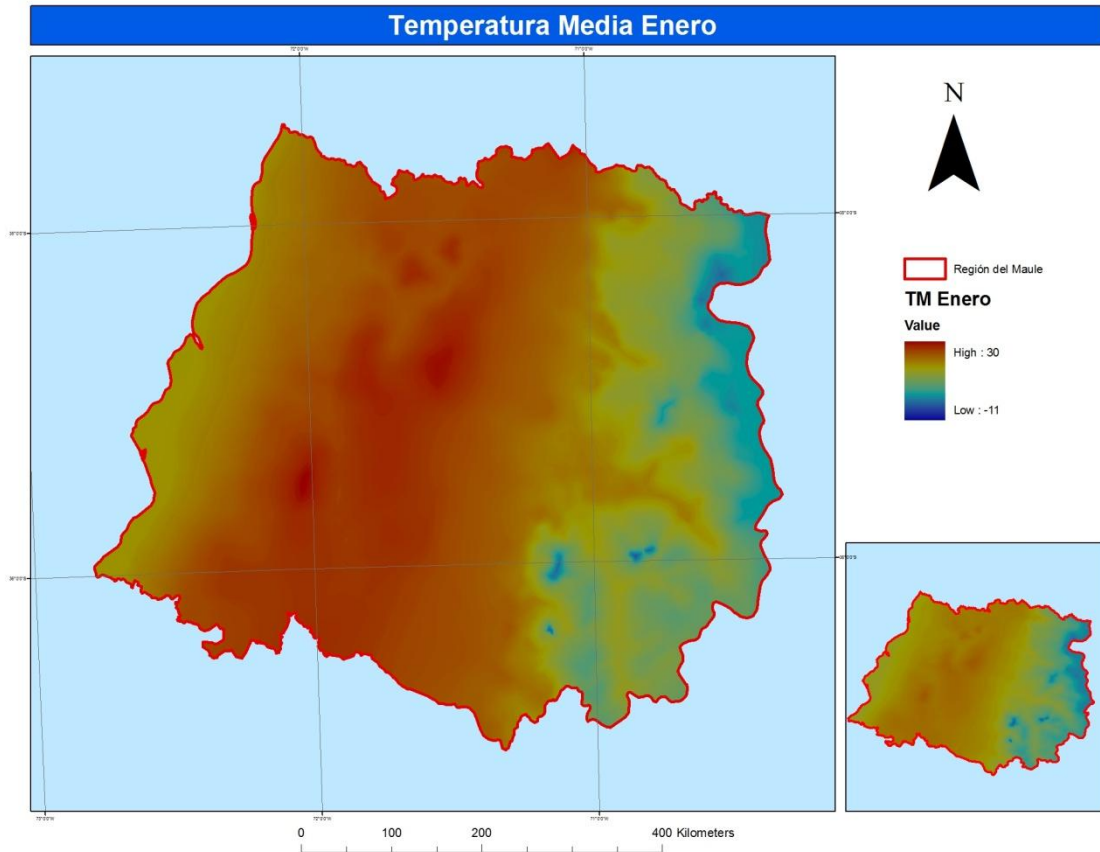


Figura 11. En el mapa principal, temperatura media de enero obtenida del promedio de las medias diarias calculadas con el método de Charles-Edwards. En el mapa secundario, temperatura media de enero trazado por el experto (Fuente: Elaboración propia).

Al costado inferior derecho de la figura podemos observar el mapa de la temperatura media de enero trazado por el experto. En ambas imágenes se aprecia un comportamiento espacial muy similar a la vista, sin embargo, se observa en el mapa obtenido mediante interpolación, una temperatura media de 6 °C aproximadamente más elevada en la depresión intermedia, que la que se observa en el mapa trazado por el experto.

De la misma forma que para el mes de enero se generó el mapa de temperatura media para el mes de marzo. Como se observa en la figura 12, la diferencia entre la temperatura media en la depresión intermedia y la costa es menos que en el mes de enero, esto por un enfriamiento más rápido en el valle que en la costa, la cual posee una temperatura más estable debido a la influencia marina. La temperatura promedio de este mapa es de 17 °C, con una máxima en la depresión intermedia de 26 °C y una mínima en la cordillera de los Andes de -4 °C.

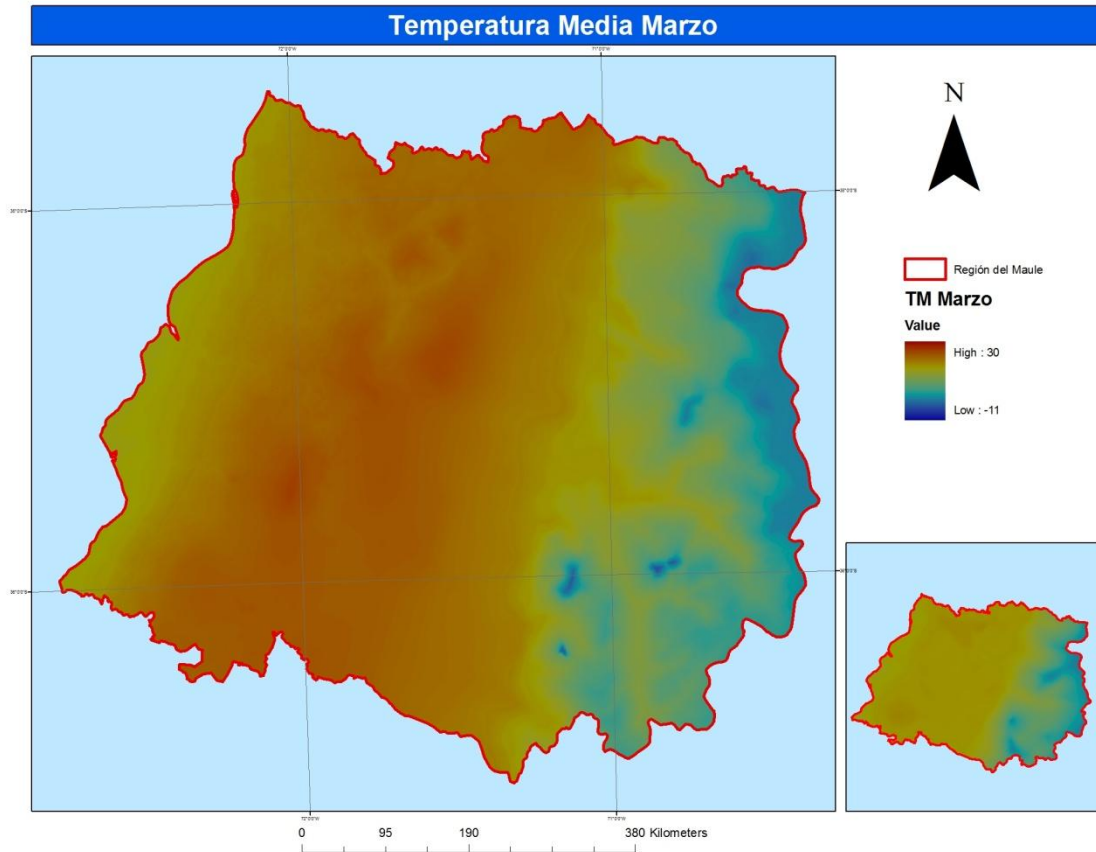


Figura 12. En el mapa principal, temperatura media de marzo obtenida del promedio de las medias diarias calculadas con el método de Charles-Edwards. En el mapa secundario, temperatura media de marzo trazado por el experto (Fuente: Elaboración propia).

Para el Mes de julio la temperatura máxima promedio no supera los $8,3^{\circ}\text{C}$, con una temperatura promedio de 1°C . En este caso, a diferencia que para el mes de enero, se observa una mayor temperatura en la costa que en la depresión intermedia, debido a la estabilidad que otorga la influencia marina (Figura 13).

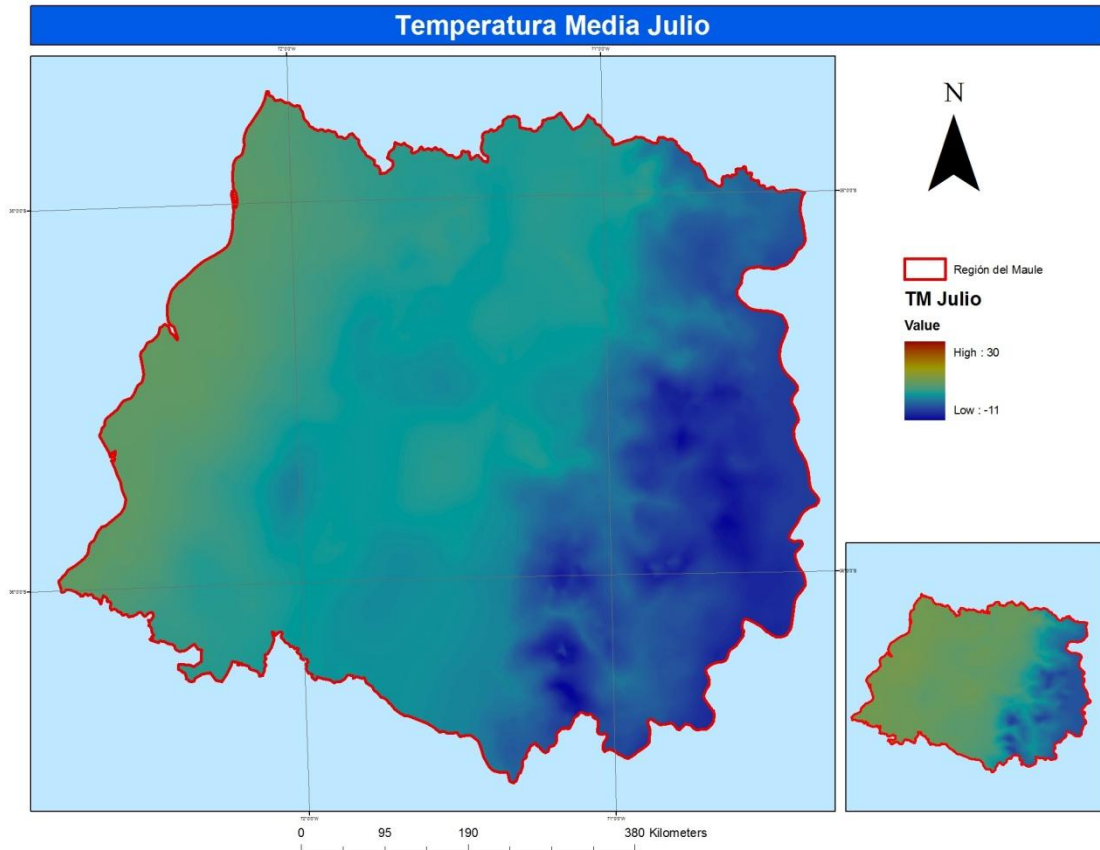


Figura 13. En el mapa principal, temperatura media de julio obtenida del promedio de las medias diarias calculadas con el método de Charles-Edwards. En el mapa secundario, temperatura media de julio trazado por el experto (Fuente: Elaboración propia).

Si comparamos el mapa calculado a partir de las medias diarias obtenidas por el método de Charles-Edwards (mapa principal) y el trazado por el experto (mapa secundario) podemos observar que, pese a poseer una distribución espacial similar, en el mapa trazado por el experto existe una marcada diferencia entre la cordillera de los Andes y el resto del área de estudio, la que no es tan clara en el mapa obtenido de las interpolaciones, debido a que el modelo se ve muy influenciado por la amplitud térmica, sobreestimando la temperatura para el mes de enero y subestimándola en el mes de julio, lo que provocó que en el valle central las temperaturas estimadas por el modelo fueran más bajas que las estimadas por el experto.

En cuanto a la obtención del mapa de temperatura media para el mes de septiembre, el resultado se puede observar en la figura 14. Este mes, al igual que marzo, corresponde a un mes en el que ocurre el equinoccio, por lo que representa la mitad del trayecto de la curva senoidal descrita por la ecuación propuesta por Charles y Edwards. En esta imagen volvemos a observar una temperatura media más elevada en la depresión intermedia que en

la costa, invirtiéndose la situación observada en el mes de julio. Esta imagen muestra el mismo patrón espacial de las anteriores, el cual es coincidente con lo esperado para esta región (Errázuriz *et al.*, 1992), presentando claramente definidas las condiciones de la costa, el valle y la cordillera. Su temperatura media es de 4 °C, con una mínima de -7 °C y una máxima de 9°C

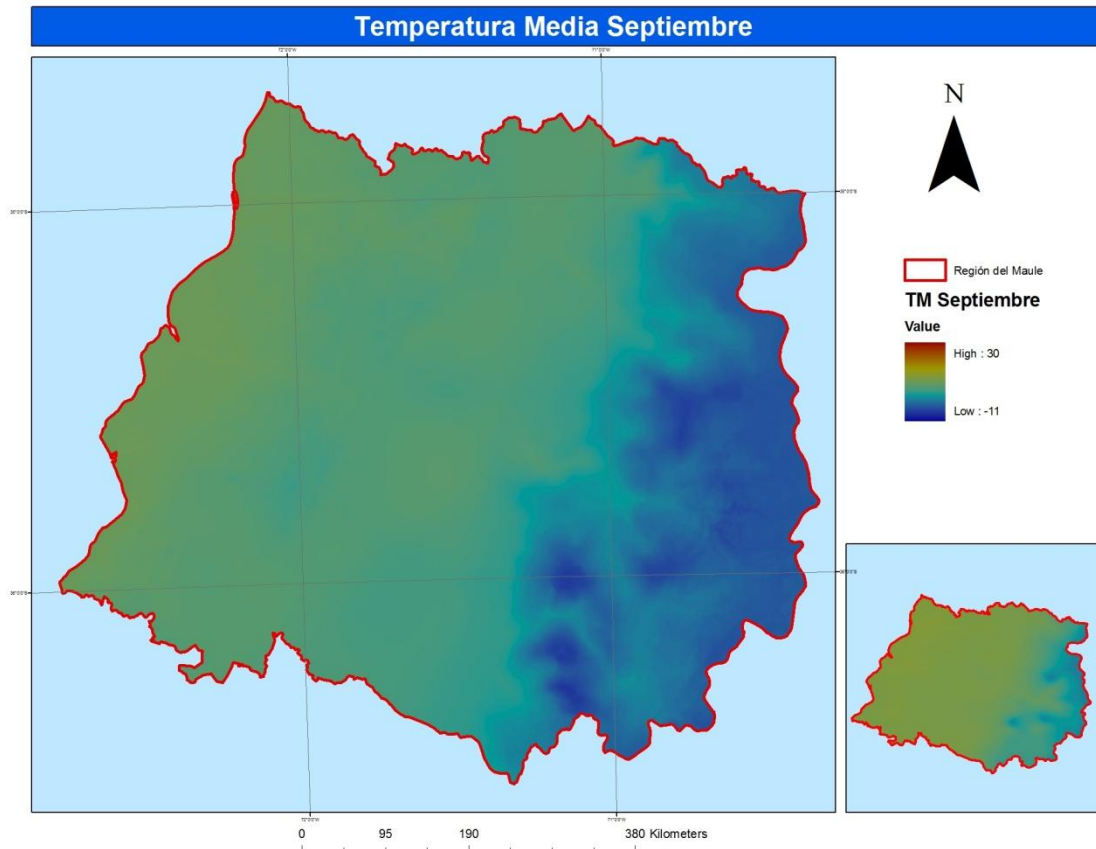


Figura 14. En el mapa principal, temperatura media de septiembre obtenida del promedio de las medias diarias calculadas con el método de Charles-Edwards. En el mapa secundario, temperatura media de septiembre trazado por el experto (Fuente: Elaboración propia).

A continuación se presentan en el cuadro 5 las temperaturas mínimas, máximas, promedios y desviación estándar de los mapas de temperatura media mensual para los 12 meses del año.

Cuadro 5. Estadísticas de la temperatura media mensual.

Mes	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	desv. Estándar (°C)
Enero	-3,72	30,23	19,86	6,8
Febrero	-3,85	29,79	19,47	6,9
Marzo	-4,16	25,91	16,92	6,5
Abril	-4,61	18,84	12,41	5,9
Mayo	-5,4	13,52	7,49	5,2
Junio	-9,52	9,84	3,22	4,7
Julio	-11,9	8,28	0,98	4,4
Agosto	-11,23	8,2	1,25	4,1
Septiembre	-7,12	9,41	4,06	4,0
Octubre	-4,91	13,2	8,47	4,4
Noviembre	-4,14	20,44	13,54	5,2
Diciembre	-3,83	26,53	17,63	6,1

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se puede apreciar claramente el comportamiento temporal de la temperatura que permitió a Charles-Edwards ajustar una curva senoidal. Para una mejor visualización de este fenómeno se grafico el comportamiento de la temperatura media mensual y la desviación estándar en la figura 15, donde se aprecia cómo a partir del verano la temperatura empieza a descender gradualmente hasta alcanzar su mínimo en el mes de julio, para posteriormente empezar a aumentar nuevamente, tal como lo describen Villalobos *et al.* (2002) y Charles-Edwards (1982).

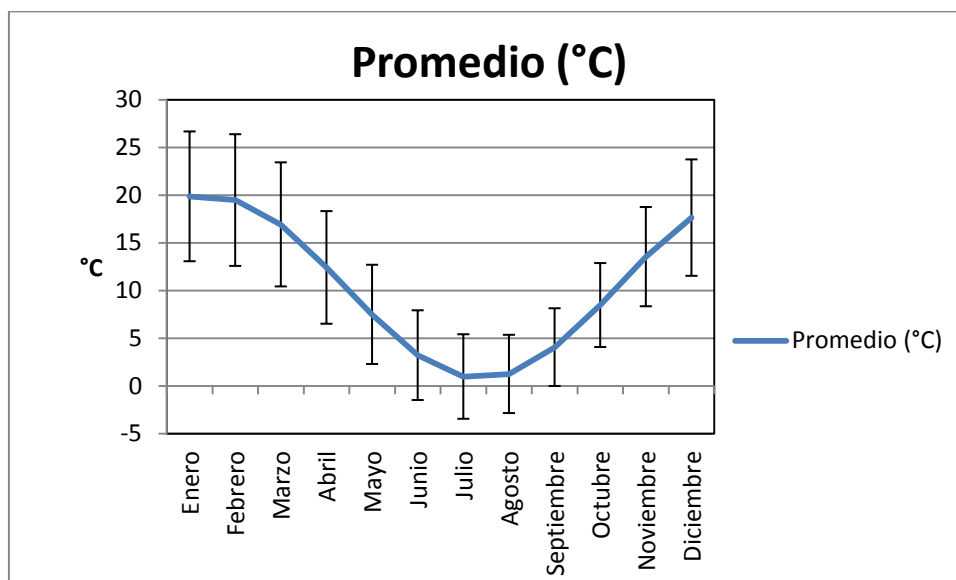


Figura 15. Temperatura media mensual y desviación estándar (Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar, tanto en el cuadro 5 como en la figura 15, que agosto y septiembre son los meses que presentan una menor desviación estándar ($4,1^{\circ}\text{C}$ y $4,0^{\circ}\text{C}$ respectivamente), mientras enero y febrero presentan la mayor variabilidad ($6,8^{\circ}\text{C}$ y $6,9^{\circ}\text{C}$ respectivamente), lo que se puede atribuir a una mayor diferencia entre la temperatura en la depresión intermedia y la cordillera en los meses más cálidos y una mayor estabilidad en la distribución de la temperatura en agosto y septiembre.

Determinación del grado de concordancia entre la interpolación realizada mediante el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto

Obtención del error de la estimación

A continuación se presentan en la cuadro 6 el error cuadrático medio de las estimaciones realizadas mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards, en base a los mapas trazados por el experto.

Cuadro 6. Error cuadrático medio de la estimación (RMSE).

Mes	RMSE ($^{\circ}\text{C}$)
Enero	5,6
Marzo	4,6
Julio	5,6
Septiembre	5,8

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la estimación del valor del error cuadrático medio, se observa que para los meses extremos existe un error de $5,6^{\circ}\text{C}$ (para enero $5,6^{\circ}\text{C}$ mayor que la temperatura inferida por el experto y para julio $5,6^{\circ}\text{C}$ menos) entre los mapas estimados mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards y los estimados por el experto. En el mes de marzo la diferencia entre los mapas es menor ($4,6^{\circ}\text{C}$) pero se mantiene lo observado en enero, una temperatura estimada por el modelo mayor a la estimada por el experto y para septiembre menor, como en el mes de julio.

Se puede observar que el mes de marzo es el que presenta el error cuadrático medio más bajo en la estimación, mientras que para los otros tres meses el error es similar, siendo para el mes de septiembre el más alto. Esto se puede deber a una sobreestimación de la amplitud térmica, la que se evidencia en que para el mes de enero la temperatura media mensual estimada mediante el método propuesto por Charles-Edwards es más alta que la estimada por el experto y luego esta desciende rápidamente llegando a ser menor que la estimada por el experto en el mes de Julio.

Si bien el error estimado para el modelo propuesto por Charles-Edwards se calculó en base a los mapas trazados por el experto, ya que son a estos los que queremos replicar, y que la relevancia de este dato dependerá del uso que se le quiera dar la interpolación, se puede

tomar a modo de referencia que en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007) se establece que con un aumento de entre 1,5°C y 2,5°C (respecto a los niveles de 1980-1999) se esperaría que entre un 20% y un 30% aproximadamente de las especies vegetales y animales consideradas a la fecha, estarían probablemente expuestas a un mayor riesgo de extinción, por lo que se puede establecer que el error en la estimación es considerablemente alto.

Análisis de Similitud Cartográfica

En este apartado se encuentran los resultados obtenidos del cálculo de la similitud cartográfica entre los mapas obtenidos del trazado experto y los obtenidos mediante el método propuesto por Charles-Edwards para cada mes, respectivamente. Cada imagen está en una escala relativa de 0% a 100% de similitud, en donde 0 corresponde a los puntos más diferentes (no es necesariamente el mismo en todas las imágenes) y 100 a los puntos que poseen valores idénticos en ambos mapas (Mapas obtenido por el método de Charles-Edwards y el obtenido a partir de el trazado experto)

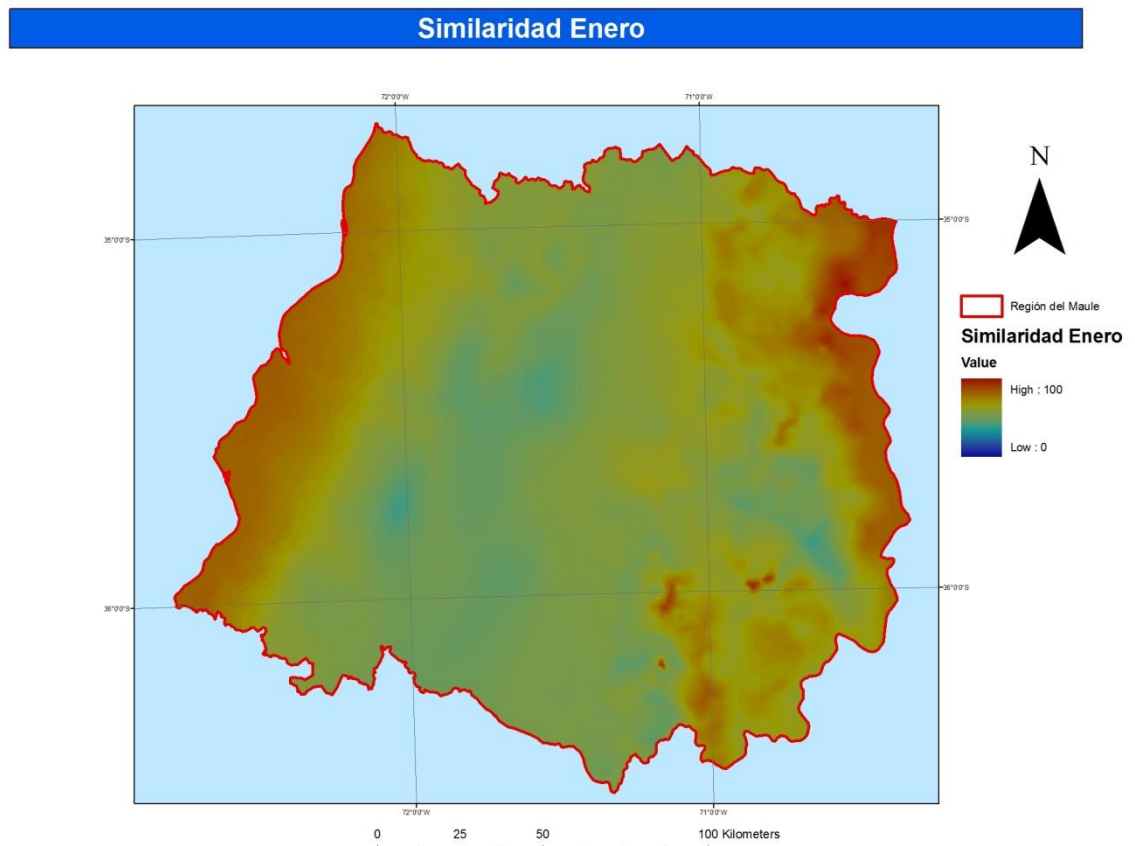


Figura 16. Estimación espacial de la similitud cartográfica para el mes de enero (Fuente: Elaboración propia).

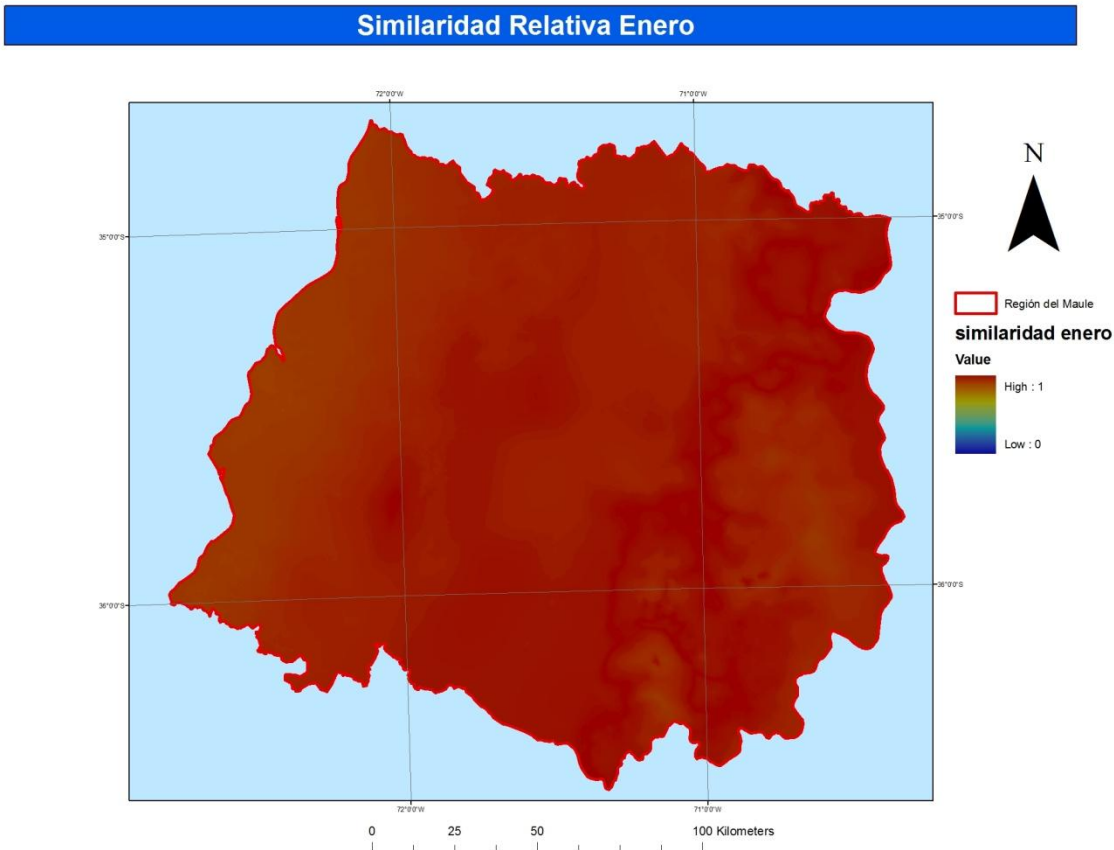


Figura 17. Estimación espacial de la similitud relativa de la distribución de la variable para el mes de enero (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede observar en la figura 16, las zonas de mayor similitud entre la imagen obtenida a partir del trazado experto y la obtenida mediante el método de Charles-Edwards corresponden a la costa y la cordillera de los Andes. Mientras los valores más bajos se observan en el valle.

Esto se atribuye principalmente a que en la imagen obtenida mediante el método de Charles-Edwards la temperatura en el valle se sobreestimó en relación al mapa obtenido del trazado experto, sobre todo en el sector del valle. Sin embargo, en la zona costera y de la cordillera de los Andes la estimación de la temperatura se ajustó de mejor forma a la del mapa obtenido a partir del trazado experto.

Por otra parte, en la imagen que muestra la similitud entre los valores relativos de temperatura media mensual del mapa trazado por el experto y el obtenido mediante el modelo, se aprecia que todos los valores se encuentran cercanos a 1, lo que demuestra que en términos de la distribución de la variable el modelo logró replicar de buena forma la distribución inferida por el experto. Esto puede ser esperado ya que el mes de enero trazado

por el experto fue uno de los utilizados para obtener la temperatura media anual que se utilizó en el modelo.

En la siguiente figura se observa la similaridad para el mes de marzo.

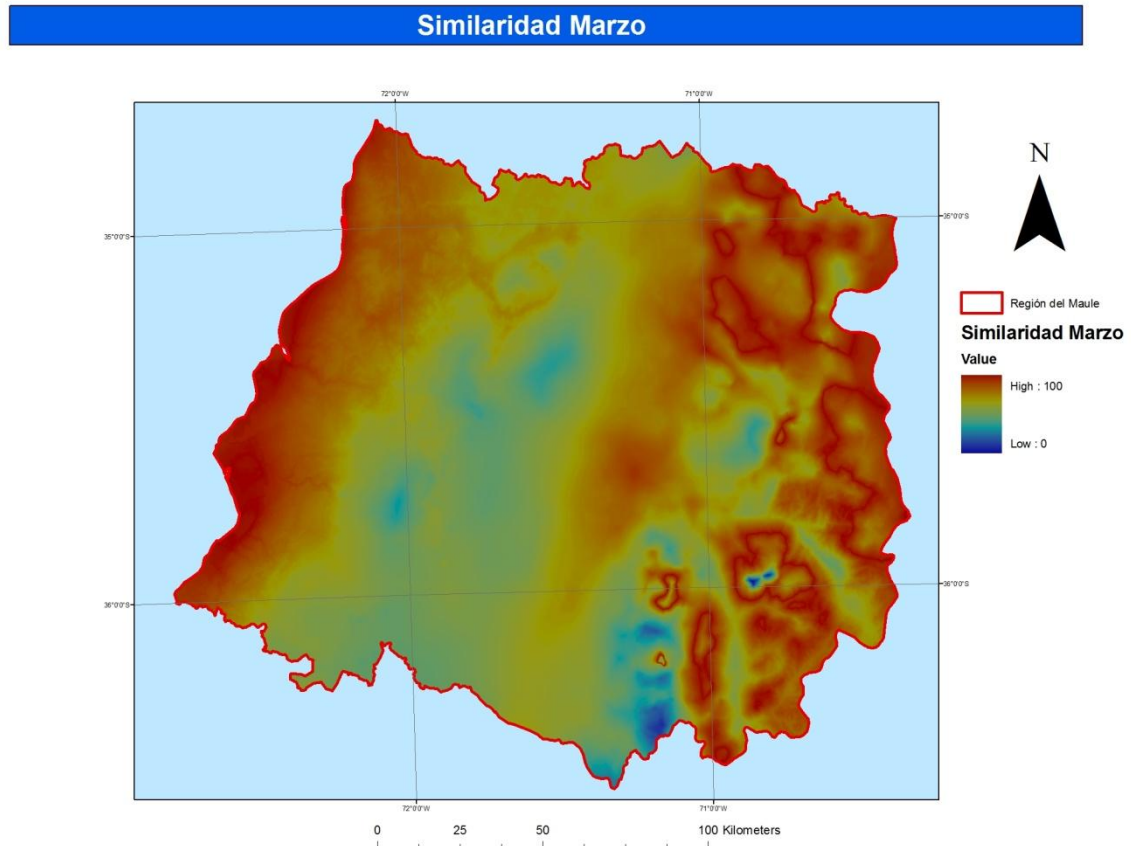


Figura 18. Estimación espacial de la similaridad cartográfica para el mes de marzo (Fuente: Elaboración propia).

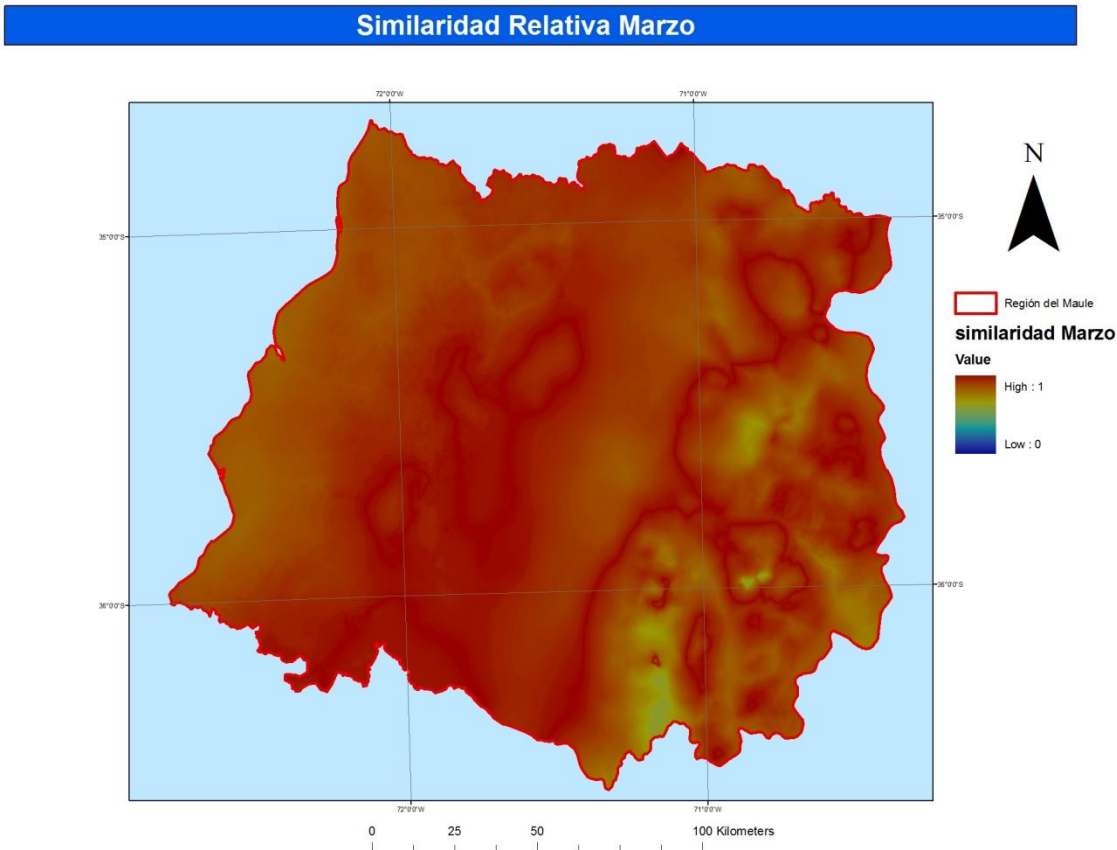


Figura 19. Estimación espacial de la similaridad relativa de la distribución de la variable para el mes de marzo (Fuente: Elaboración propia).

Al igual que en el mes de enero, en marzo podemos observar que en la costa y la cordillera de los Andes es donde los valores de la temperatura media mensual son más similares entre el mapa trazado por el experto y el obtenido mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards. Por otra parte se aprecia que en la parte central del valle y en algunos puntos particulares de la cordillera de los Andes se encuentran los valores de similaridad más bajos, lo que indica que en estos sectores la estimación del valor de la temperatura media mensual fue el más distante entre ambos mapas.

En el caso de los sectores de baja similaridad en la cordillera de los Andes, se puede explicar por el hecho de que el modelo propuesto por Charles-Edwards se ve más influenciado por la altitud, al incorporar esta en la estimación del coeficiente Z, que lo que se ve influenciado el experto al momento de trazar los mapas, quien incorpora otros factores que hacen que la variación de la temperatura no sea tan abrupta al momento de encontrar un punto de gran altitud y que se suavice aun más al utilizar el método del Vecino Natural para su rasterización.

En cuanto a la distribución espacial de la variable se puede ver que el mapa obtenido con el modelo de Charles-Edwards replica de buena manera la distribución inferida por el experto, aunque se aprecian sectores de una menor similitud que coinciden con los sectores con menor similitud ubicados en la cordillera de los Andes.

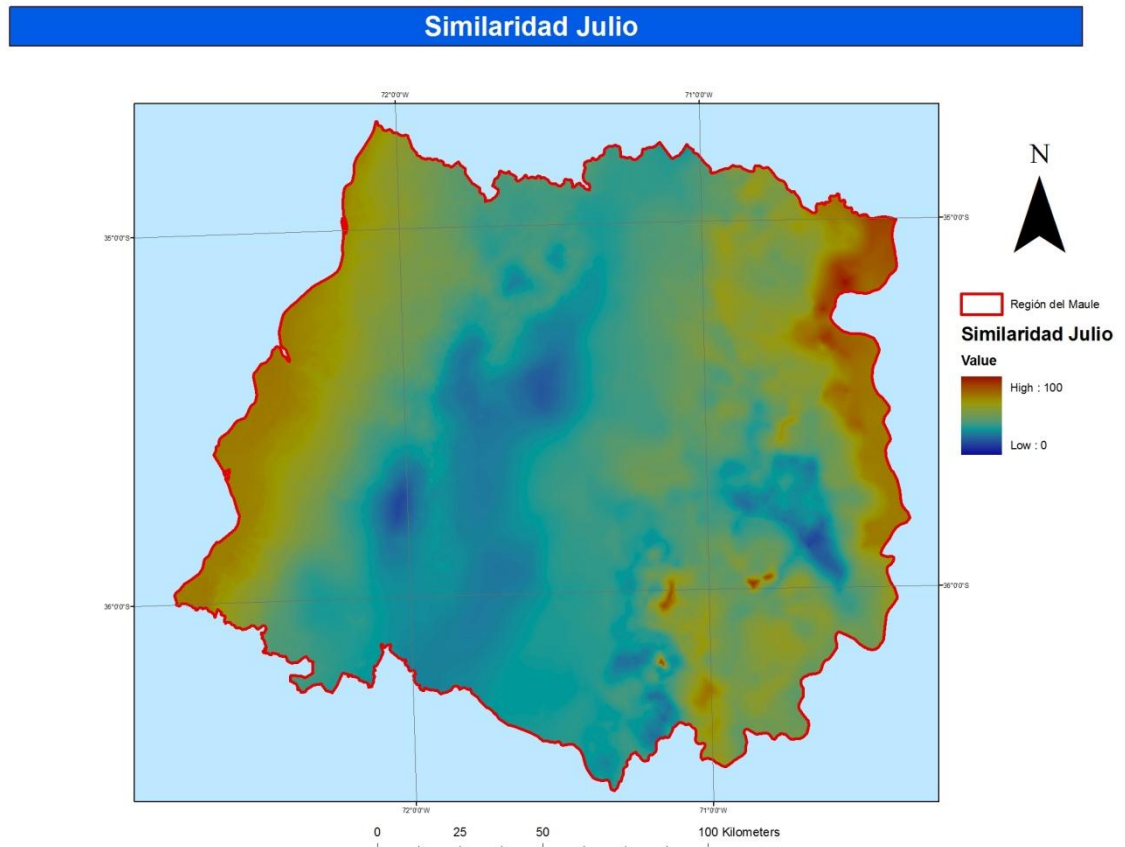


Figura 20. Estimación espacial de la similitud cartográfica para el mes de Julio (Fuente: Elaboración propia).

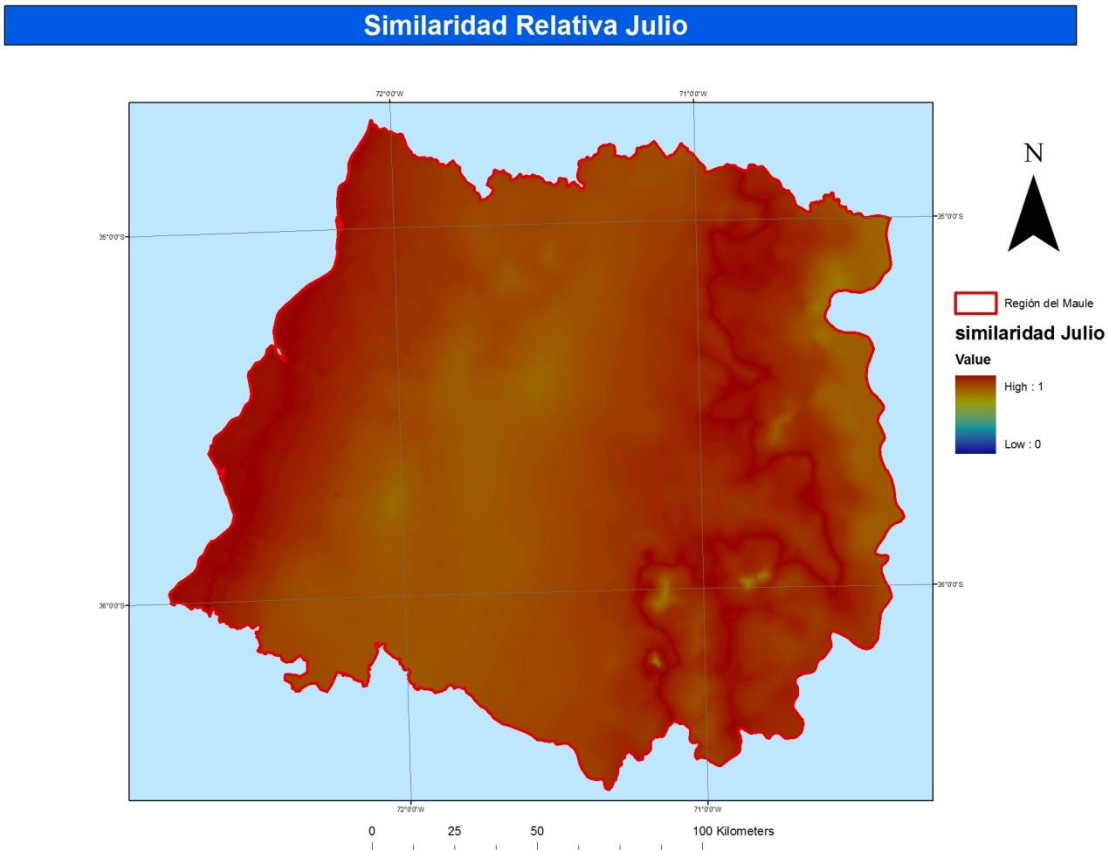


Figura 21. Estimación espacial de la similaridad relativa de la distribución de la variable para el mes de julio (Fuente: Elaboración propia).

Para el mes de julio, al igual que para el mes de enero y marzo, es en la costa y la cordillera de los andes en donde se aprecia una mayor similaridad entre los mapas. Sin embargo, se aprecia una gran zona en el valle central y parte de la cordillera de los Andes, en la cual la similitud entre los valores estimados por el modelo propuesto por Charles-Edwards y los estimados por el experto son notoriamente menor. Esto se explica debido a que en el sector del valle la similaridad es menor debido a que el mapa obtenido por el modelo de Charles-Edwards influenciado por la amplitud térmica, estimó valores menores que los estimados por el experto.

En la Figura 21 podemos observar que, a pesar que en términos del valor de la variable se aprecie un amplio sector en el valle y cordillera en el cual la estimación dista en mayor medida del mapa obtenido del trazado experto existe, en términos de distribución de la variable, una gran similitud.

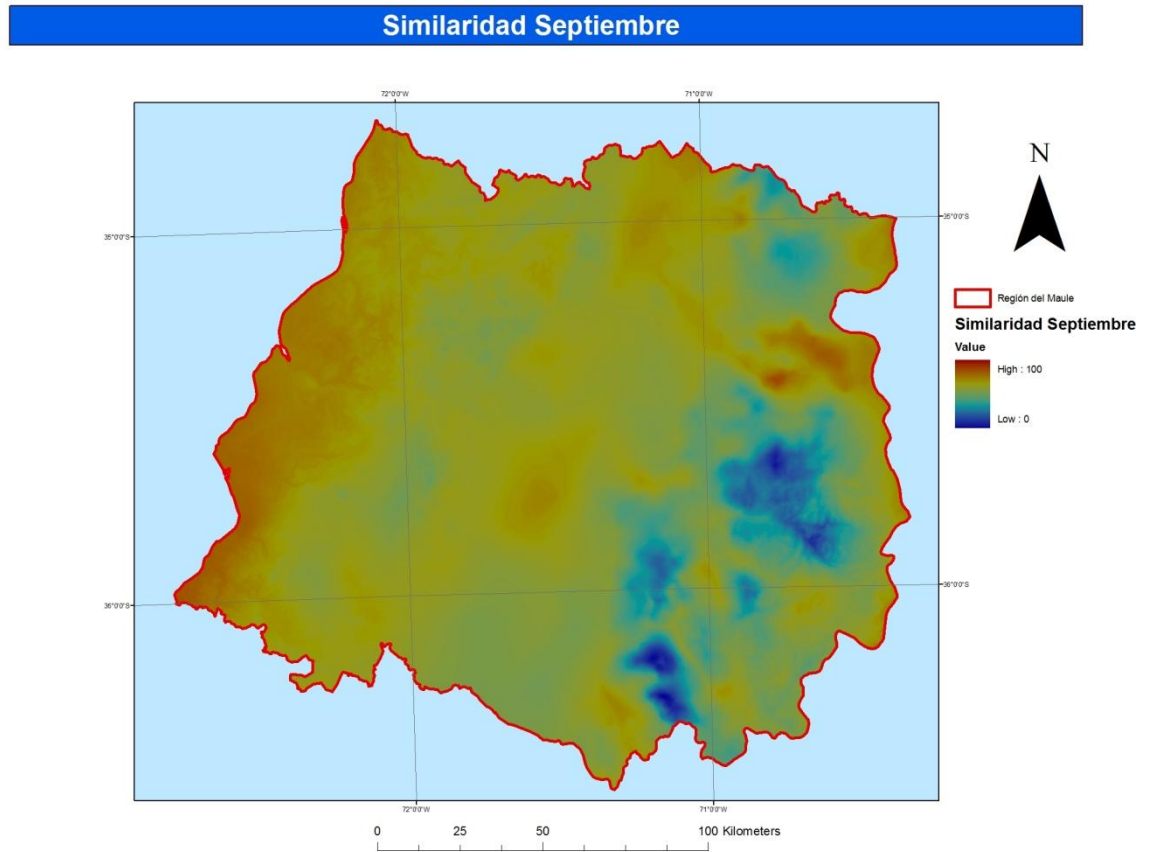


Figura 22. Estimación espacial de la similaridad cartográfica para el mes de septiembre (Fuente: Elaboración propia).

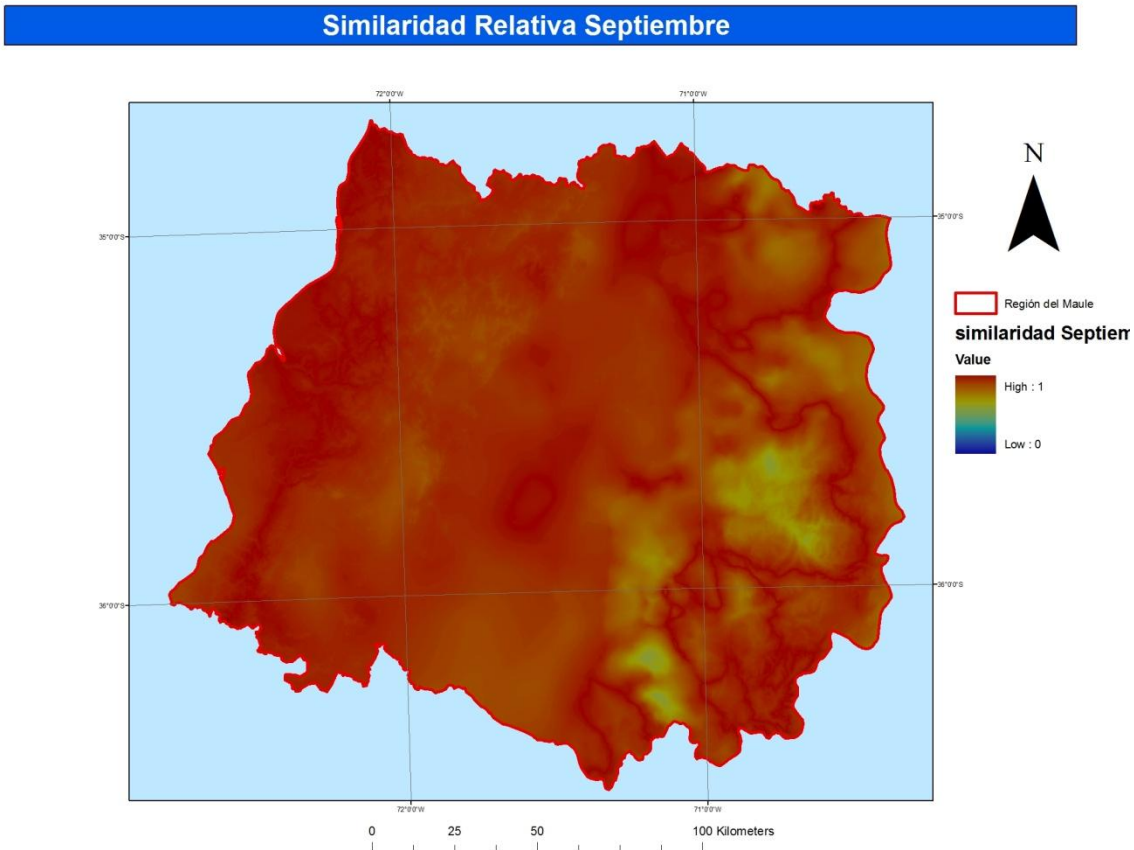


Figura 23. Estimación espacial de la similitud relativa de la distribución de la variable para el mes de septiembre (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 22 se observa algo distinto a lo que se observó en los meses de enero, marzo y julio, mostrando una mayor similitud en el valle central y sector costero y menor en la cordillera de los Andes y de la costa. Esto se debe a que el modelo propuesto por Charles-Edwards estimó temperaturas muy bajas en los sectores más altos, a diferencia de lo que infirió el experto en estos sectores para este mes.

En la Figura 23 se puede apreciar claramente los sectores de menor similitud que se observaron en la Figura 22, los cuales se encuentran en la cordillera de los Andes. Sin embargo, salvo estas diferencias en cuanto a la distribución de la variable se puede apreciar una gran coincidencia entre lo que infirió el experto y lo que reprodujo el modelo propuesto por Charles-Edwards.

En términos generales, el modelo propuesto por Charles-Edwards logró reproducir la distribución espacial de la temperatura media mensual, como se pudo observar en las imágenes correspondientes a la similitud entre los valores relativos de la variable. Esto se debe a que se le induce este patrón mediante el ingreso del mapa de la temperatura media

anual, el cual contiene la distribución espacial que el experto infiere que debe tener la variable en el área de estudio.

Por otra parte, en cuanto al valor de la variable, se apreció que el modelo sobreestimó la temperatura para los meses de enero y marzo, mientras que para los meses de julio y septiembre las subestimó. Esto se puede atribuir a una sobreestimación de la amplitud térmica utilizada como dato de entrada para el modelo ya que el modelo propuesto por Charles-Edwards suma a la temperatura media anual el valor de la amplitud térmica ponderado por una función senoidal que se acerca más a 1 en el mes de enero y a -1 en el mes de julio.

Cabe destacar que los valores de similaridad cartográfica se calculan en base al pixel más similar y el menos similar entre el mapa obtenidos del trazado experto y el mapas obtenidos por el modelo propuesto por Charles-Edwards para cada mes, otorgando de esta manera los valores entre 0 y 100, por lo que no son comparable entre distintos meses. Por lo tanto, este análisis solo muestra en qué zonas el modelo logro acercarse más a los valores estimados por el experto y donde menos. Sin embargo, en el análisis de los valores relativos se logra aislar las diferencias por el valor de la variable y permite observar como fue la distribución de esta y si el modelo logró replicarla, pese al error en el valor absoluto del pixel.

Análisis cualitativo de la concordancia entre la interpolación realizada por el método de Charles-Edwards y los mapas trazados por el experto

Para realizar el análisis cualitativo se seleccionaron 12 trazados hipsométricos, en los cuales se observa el comportamiento de la temperatura. En la figura 24 se puede observar cada uno de estos trazados.

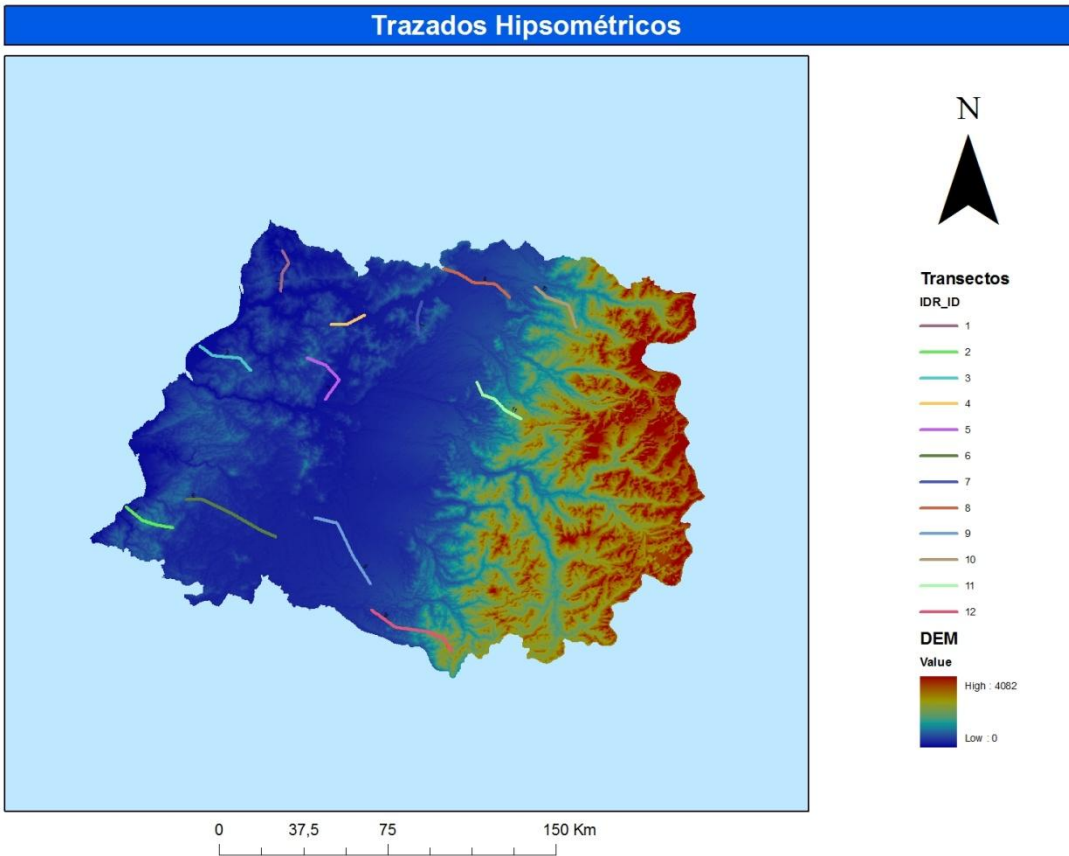


Figura 24. Distribución espacial de los trazados hipsométricos (Fuente: Elaboración propia).

A continuación se presentan los gráficos para cada uno de los transectos analizados. En estos se puede apreciar el comportamiento de la variable en el mapa obtenido de los trazados realizados por el experto (T° Experto) y en el mapa obtenido mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards (T° estimada), además se incluye la hipsometría en la trayectoria de los transectos (Elevación).

Es necesario declarar, antes de presentar estos resultados, que la variación en la hipsometría observada en los gráficos fue obtenida del DEM, el cual posee una resolución de 90 m, la cual es mayor que la resolución del estudio, por lo que parte de esta no fue percibida al momento de realizar los trazados por el experto.

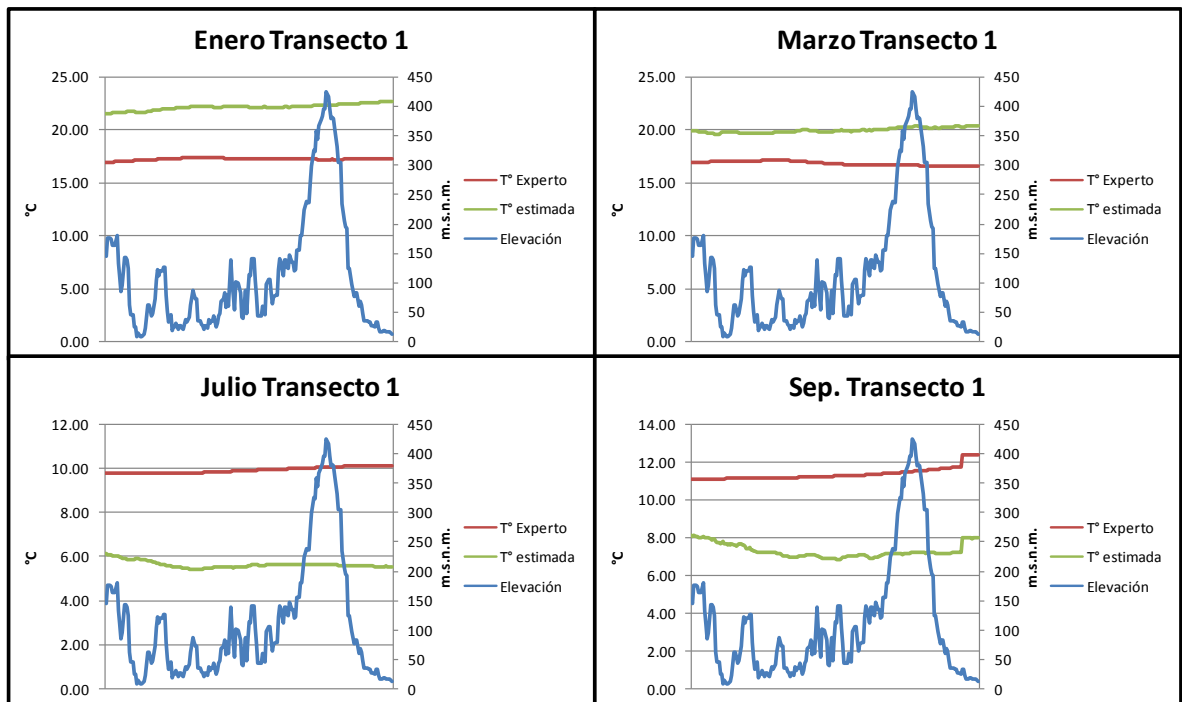


Figura 25. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 1 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 1 posee una extensión de 19 Km y alcanza una altura máxima de 425 m.s.n.m., representa al sector con influencia costera y se extiende hasta alcanzar la rivera del río Mataquito.

En la Figura 25 se puede observar que para los cuatro meses analizados el comportamiento de la variable es similar, presentando un comportamiento estable, poco relacionado con la topografía observada. Este comportamiento es el que se espera para la variable en el sector de la costa, debido a la fuerte influencia marina y la inercia térmica que esta genera. Para todos los meses, tanto para el mapa obtenido del trazado experto como el obtenido mediante el modelo, se observa que la diferencia entre la temperatura máxima y mínima no supera 1°C.

En los meses de enero y marzo la temperatura estimada por el modelo propuesto por Charles-Edwards es superior a la observada en el mapa que se obtiene del trazado experto, siendo para enero 5°C mayor y para marzo 3°C mayor aproximadamente. Para los meses de julio y septiembre este comportamiento se invierte, siendo el valor estimado por el modelo menor al que se observa en el mapa obtenido del trazado experto, con una diferencia de 4°C para julio y septiembre aproximadamente.

Cuadro 7. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 1.

Transecto 1	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	17,34	22,66	16,84	21,56	17,17	22,16
Marzo	17,09	20,33	16,52	19,51	16,77	19,91
Julio	10,08	6,13	9,77	5,41	9,90	5,62
Septiembre	12,38	8,13	11,09	6,83	11,36	7,29

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 se presentan los gráficos del transecto 2 para los cuatro meses analizados.

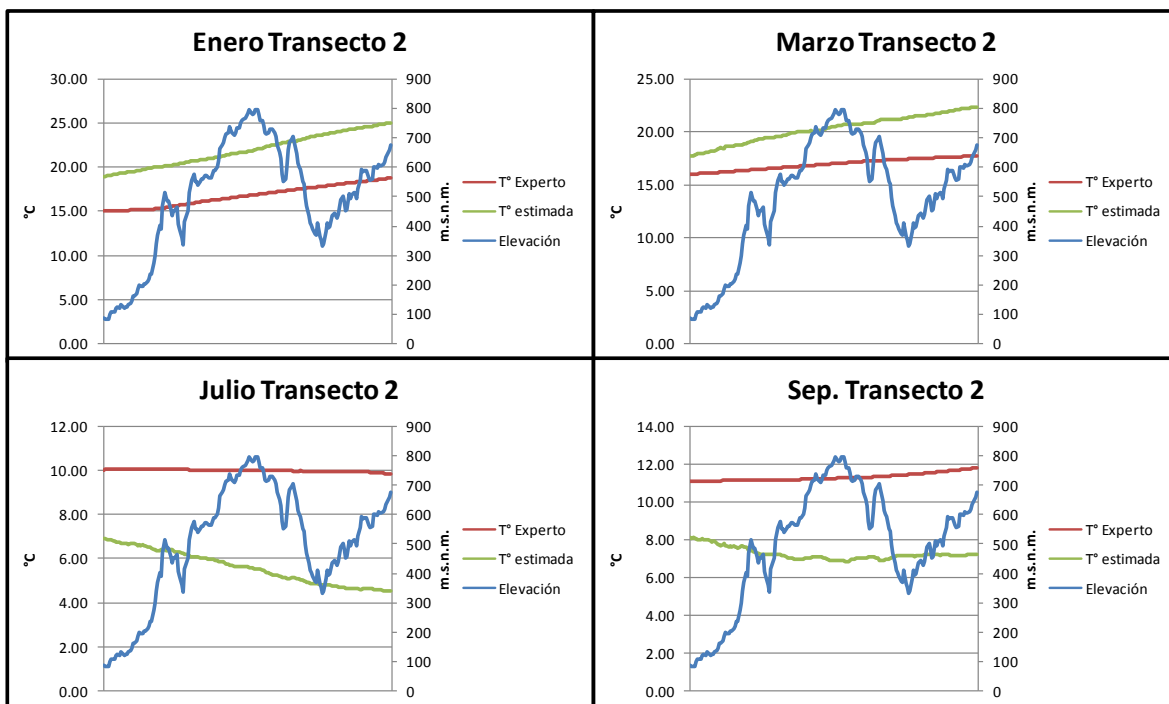


Figura 26 Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 2 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 2 se encuentra en el extremo sur del sector costero de la zona de estudio y se extiende hacia el interior recogiendo aspectos de la cordillera de los andes, alcanzando una altura máxima de 790 m.s.n.m. y una extensión de 22 Km.

En este caso, a pesar de la gran influencia costera, se puede apreciar una mayor variación en la variable asociada al aumento de la elevación al adentrarse en dirección a la cordillera de la costa. La influencia del relieve se ve más acentuada en la estimación realizada por el

modelo, lo que se puede atribuir a la inclusión de la elevación en al cálculo del coeficiente Z utilizado en la ecuación 1.

En los meses de enero y marzo se observa que la variable obtenida por el modelo mantiene el mismo patrón que la obtenida del trazado experto, con un leve aumento de la temperatura hacia el interior, lo que evidencia un incremento más rápido de la temperatura a medida que nos alejamos del borde costero. En cuanto al mes de julio, se observa el fenómeno contrario, disminuyendo su temperatura a medida que se aleja del borde costero, siendo este descenso más acentuado en la temperatura estimada por el modelo propuesto por Charles-Edwards. El mes de septiembre es el único que muestra una divergencia entre lo inferido por el experto y lo estimado por el modelo, ya que como se observa en el mapa trazado por el experto la temperatura aumenta levemente hacia el interior, lo que se condice con la inercia térmica provocada por la influencia marina que hace que en este mes, en que la radiación solar empieza a aumentar nuevamente, sea hacia el interior donde se empiece a calentar más rápidamente.

En el cuadro 8 observamos las temperaturas máximas, mínimas y el promedio de la variable en el transecto 2 para el mapa obtenido del trazado experto y el obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards. Se puede destacar la gran similitud entre el mes de enero y marzo y el hecho de que en general la diferencia entre la temperatura observada en el mapa obtenido del trazado experto y el modelo varía entre 3°C a 5°C aproximadamente.

Cuadro 8. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 2.

Transecto 2	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	18,69	24,95	15,00	18,84	16,68	21,87
Marzo	17,68	22,35	15,99	17,65	16,92	20,26
Julio	10,03	6,88	9,81	4,50	9,97	5,57
Septiembre	11,76	8,13	11,09	6,83	11,30	7,25

Fuente: Elaboración propia

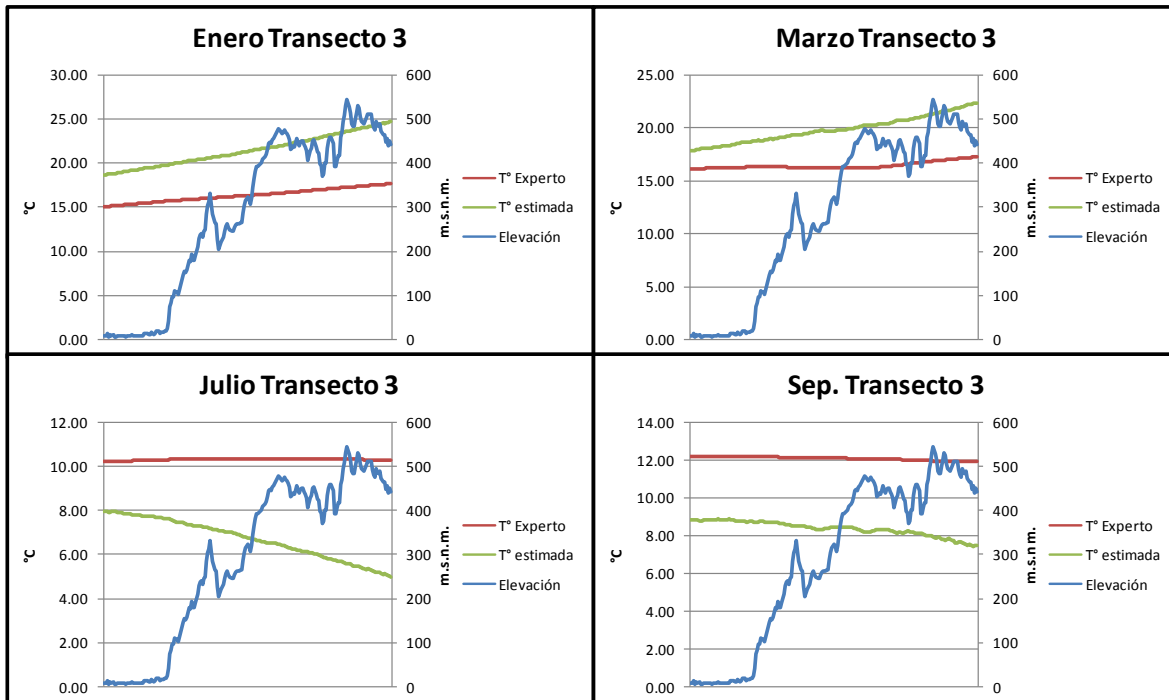


Figura 27. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 3 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 3 corresponde, al igual que los dos anteriores, al sector costero y cordillera de la costa, ubicándose en la parte central de esta zona. Su extensión es de 25 Km y va paralelo al tramo final del río Maule, su elevación máxima alcanza los 544 m.s.n.m.

El comportamiento de la variable en este transecto es el esperado, con una baja variabilidad y una influencia de la altura poco significativa, siendo el carácter costero el predominante en el patrón de comportamiento de la variable.

En el mes de enero y marzo se aprecia un aumento de la temperatura hacia el interior a medida que se aleja del océano, debido a que se necesita mayor calor para calentar los cuerpos de agua que las zonas más continentales. En marzo se observa que la diferencia entre la costa y el interior disminuye, lo que se debe a que en los meses de más calor el sector costero acumuló la energía necesaria para aumentar su temperatura y hacia el interior ya empieza a notarse la disminución en la radiación solar incidente.

En el mes de julio, al igual que en los transectos anteriores, el modelo subestimó la temperatura en relación a el mapa obtenido del trazado experto y además se observa una mayor relación con el relieve, siendo la disminución de la temperatura hacia el interior más abrupta que la que estimó el experto debido al aumento en la elevación. El mismo patrón

muestra el mes de septiembre, sin embargo, se genera un aumento en la temperatura hacia el interior, lo que hace más estable la variable a lo largo del transecto.

En el cuadro 9 podemos observar que la temperatura promedio en este transecto costero es similar en el mes de enero y marzo, lo que muestra la estabilidad de la variable en esta zona.

Cuadro 9. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 3.

Transecto 3	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	17,63	24,64	14,99	18,62	16,30	21,39
Marzo	17,18	22,29	16,10	17,81	16,40	19,82
Julio	10,33	7,95	10,19	4,94	10,30	6,68
Septiembre	12,17	8,86	11,89	7,37	12,06	8,33

Fuente: Elaboración propia

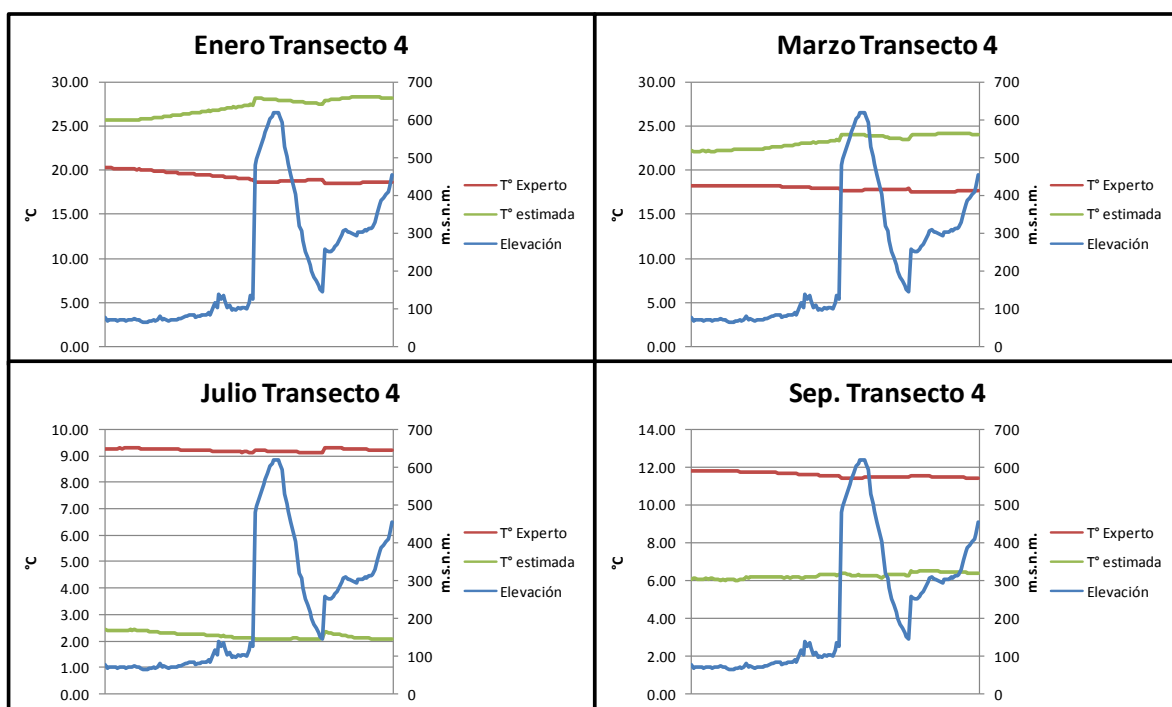


Figura 28. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 4 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 4 se ubica en los 71,742° de latitud sur y 35,121° longitud oeste, iniciando su recorrido en el río Mataquito y recorre en dirección sur-oeste 15 Km, alcanzando una elevación máxima de 618 m.s.n.m.

En este transecto se puede destacar la estabilidad de la variable en todos los meses y tanto en el mapa obtenido del trazado experto como en el obtenido del modelo propuesto por Charles-Edwards. Esta estabilidad se le puede atribuir a la cercanía al Río Mataquito, a lo corto del transecto y a una variación en la elevación que no supera los 500 m.

En el cuadro 10 podemos observar esta estabilidad, sobre todo en los meses de julio y septiembre, en donde la diferencia entre la temperatura máxima y mínima no supera los 0,5°C. Pese a que en el caso del mapa obtenido del trazado experto y el estimado por el modelo propuesto por Charles-Edwards el comportamiento de la temperatura es similar, la diferencia en el valor de la variable es de casi 8°C para enero, 7°C para julio y 6°C para marzo y septiembre aproximadamente.

Cuadro 10. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 4.

Transecto 4	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	20,33	28,30	18,41	25,61	19,14	27,11
Marzo	18,15	24,15	17,48	22,05	17,85	23,23
Julio	9,29	2,42	9,13	2,06	9,21	2,18
Septiembre	11,81	6,48	11,38	6,00	11,58	6,24

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan en la Figura 29 los gráficos del transecto 5 para los meses de enero, marzo, julio y septiembre.

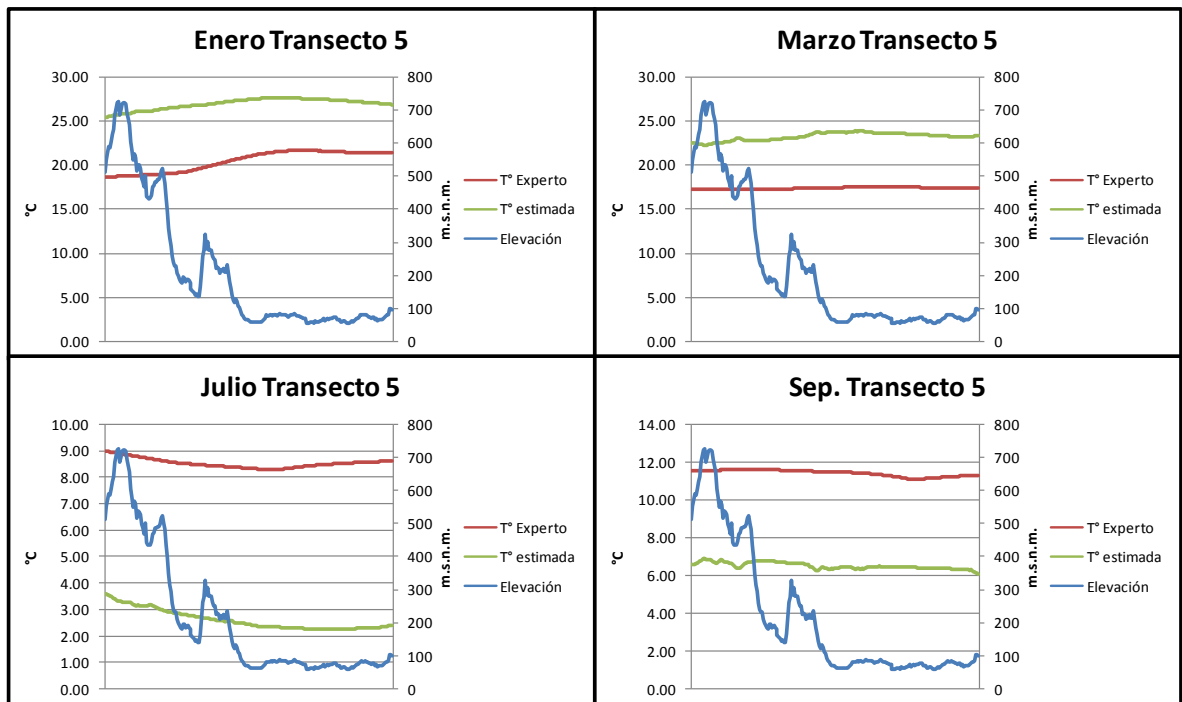


Figura 29. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 5 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 5 ($71,742^{\circ}\text{S}$, $35,121^{\circ}\text{O}$) recorre los últimos tramos de la cordillera de la costa y recoge los primeros sectores del valle central. Su extensión es de 28 Km y su elevación máxima es de 725 m.s.n.m.

Para el mes de enero se puede observar un ascenso en la temperatura de 3°C en el mapa obtenido del trazado experto y de 2°C en el mapa obtenido con el modelo aproximadamente a medida que desciende la elevación hacia el valle. Ambos mapas, el trazado por el experto y el obtenido mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards, presentan el mismo patrón de comportamiento observándose un desplazamiento de 6°C aproximadamente hacia arriba de la curva estimada por el modelo en relación al mapa obtenido del trazado experto.

En el mes de marzo se aprecia una variación muy baja en la temperatura a lo largo del transecto para ambos mapas, producto del descenso de la temperatura en los sectores más bajos que se empieza a producir a partir del equinoccio de otoño y que lleva a que en el mes de julio la temperatura en esta zona llegue a ser levemente menor a la que se observa en los sectores más altos. En ambos meses la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima en general no superan 1°C (Ver cuadro 11). En el mes de septiembre se observa la misma estabilidad que en los meses anteriores, aunque con un aumento de la temperatura de 3°C aproximadamente.

Cuadro 11. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 5.

Transecto 5	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	21,64	27,66	18,55	25,35	20,39	26,95
Marzo	17,52	23,85	17,18	22,26	17,34	23,21
Julio	8,95	3,57	8,28	2,24	8,50	2,59
Septiembre	11,57	6,87	11,06	6,05	11,38	6,49

Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura (Figura 30) muestra el comportamiento de la variable en el transecto 6.

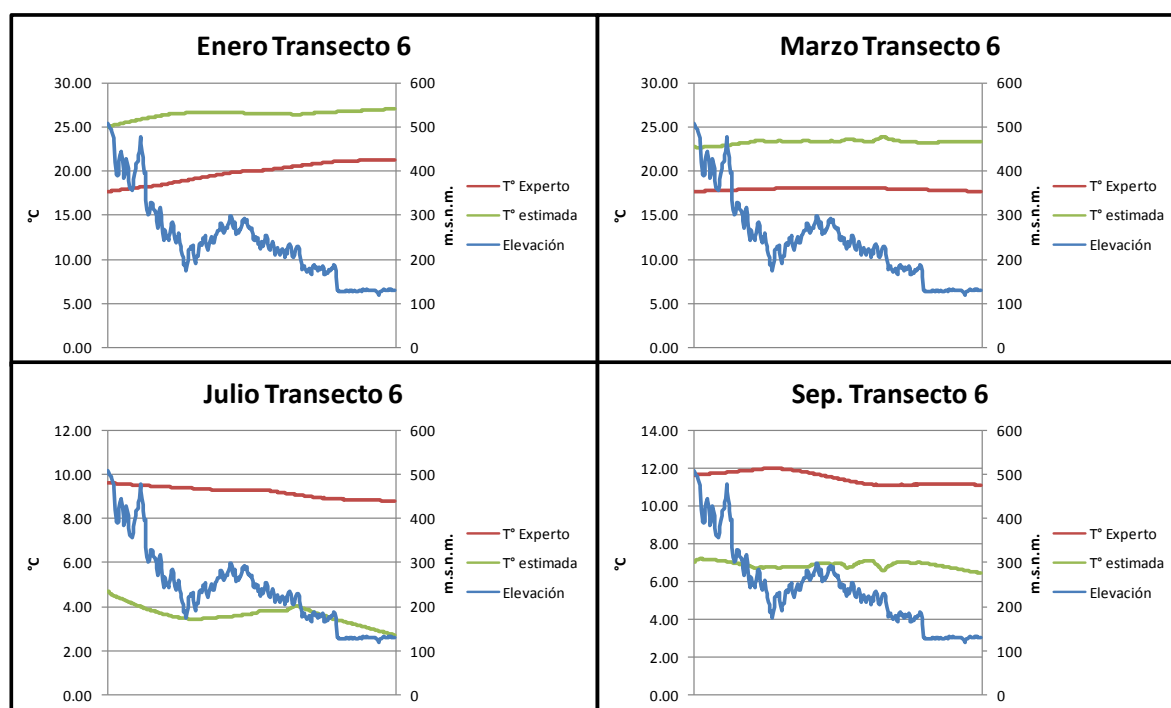


Figura 30. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 6 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 6 es el más extenso de todos con una longitud de 41 Km partiendo en los 72,400° S, 35,832° O y extendiéndose hacia el interior recogiendo principalmente el sector del valle central, su elevación alcanza los 508 m.s.n.m. y desciende hasta los 119 m.s.n.m.

Este transecto recoge un escenario similar al del transecto 5 y presenta un comportamiento similar a este. Se observa una gran estabilidad en la variable pese a lo extenso del recorrido, en donde en el mes de enero se aprecia como la temperatura aumenta a medida que se adentra en la depresión intermedia, siendo esta variación aproximadamente de 2°C en el

mapa obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards y de 3,5°C aproximadamente en el mapa obtenido a partir del trazado experto (ver Cuadro 12). La diferencia entre el promedio de la temperatura del transecto para ambos mapas es un poco mayor a 6°C y constante a lo largo de este.

En los meses de marzo, julio y septiembre la variación de la variable a lo largo del transecto no supera en general 1°C (ver cuadro 12), siendo muy estable, variando de un mes a otro de forma pareja, desplazando la curva hacia abajo en el mes de julio y luego empieza a desplazarse nuevamente hacia arriba en el mes de septiembre. La amplitud térmica, entre enero y julio, observada en este transecto es de 10°C aproximadamente para el mapa obtenido del trazado experto y de 23°C aproximadamente en el mapa obtenido con el modelo, lo que muestra un aumento de la amplitud a medida que se aleja de la costa.

En el cuadro 12 se puede destacar la gran diferencia en el valor de la variable que se aprecia entre el mapa trazado por el experto y el obtenido por el modelo para los cuatro meses analizados, como también lo que se ha observado en todos los transectos, que en los meses de enero y marzo el modelo sobreestimó la temperatura y para los meses de julio y marzo la subestimó.

Cuadro 12. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 6.

Transecto 6	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	21,22	26,99	17,67	25,04	19,80	26,42
Marzo	18,03	23,89	17,65	22,67	17,89	23,32
Julio	9,61	4,68	8,79	2,69	9,20	3,60
Septiembre	11,99	7,18	11,09	6,45	11,48	6,85

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se presentan los gráficos del transecto 7 para los meses de enero, marzo, julio y septiembre; en donde se muestra el comportamiento de la variable temperatura media mensual en el mapa obtenido del trazado experto y del mapa obtenido mediante el modelo propuesto por Charles-Edwards.

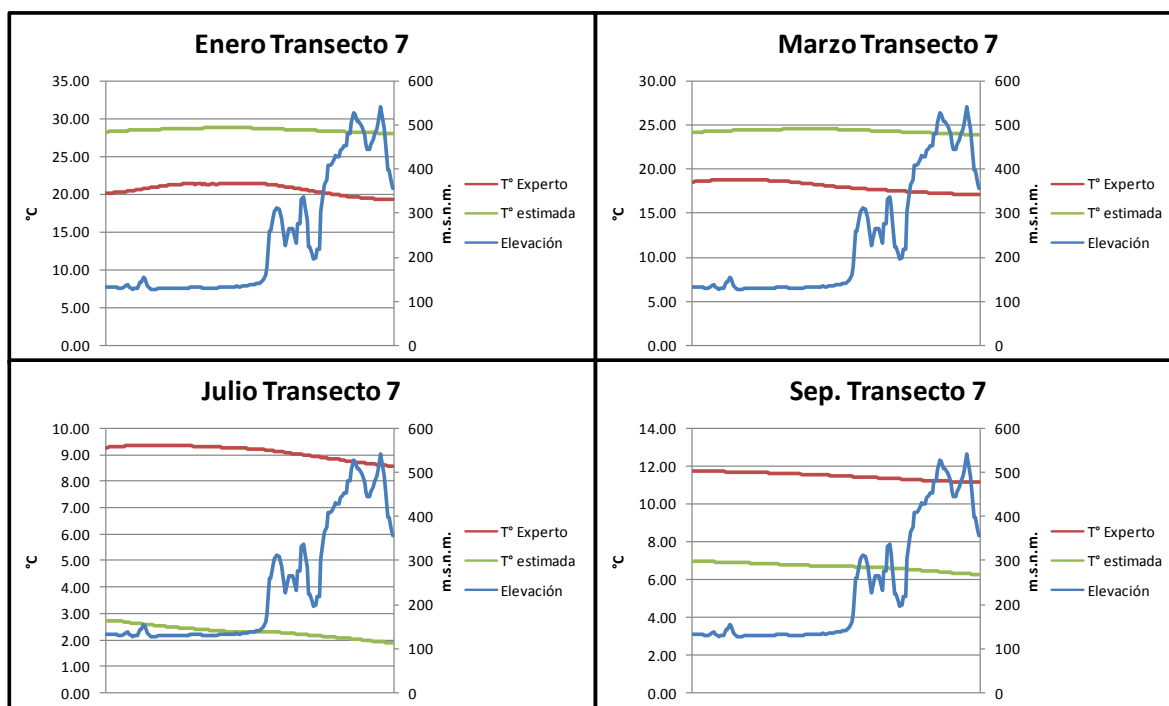


Figura 31. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 7 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 7 tiene una extensión de 14 Km y parte en el río Mataquito y se extiende en dirección sur desde los 71.452° S, 35,031° O. Su elevación va desde los 125 m.s.n.m. hasta los 542 m.s.n.m.

Para los cuatro meses analizados se observa que la variable se comporta de forma estable, mostrando un leve descenso a medida que avanza hacia el sur. Como se puede observar en el cuadro 13 la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de 1°C aproximadamente en todos los casos, excepto en el mapa de enero obtenido a partir del trazado experto, donde la diferencia es levemente mayor alcanzando los 2°C aproximadamente.

Se destaca también que para todos los meses el comportamiento de la variable a lo largo de este transecto es similar, tanto para el mapa obtenido del trazado experto como para el mapa obtenido del modelo propuesto por Charles-Edwards. La variable tiene un comportamiento esperado, con una temperatura estable y un leve descenso a medida que aumenta la altura y se dirige hacia el sur. La magnitud de la variación se puede atribuir a la corta extensión del transecto y a la influencia del río Mataquito.

Cuadro 13. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 7.

Transecto 7	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	21,37	28,74	19,34	28,06	20,63	28,47
Marzo	18,69	24,51	17,12	23,91	17,98	24,29
Julio	9,35	2,69	8,54	1,89	9,10	2,29
Septiembre	11,71	6,97	11,11	6,22	11,44	6,67

Fuente: Elaboración propia

La Figura 32 muestra el comportamiento de la variable para el transecto 8, para los cuatro meses analizados.

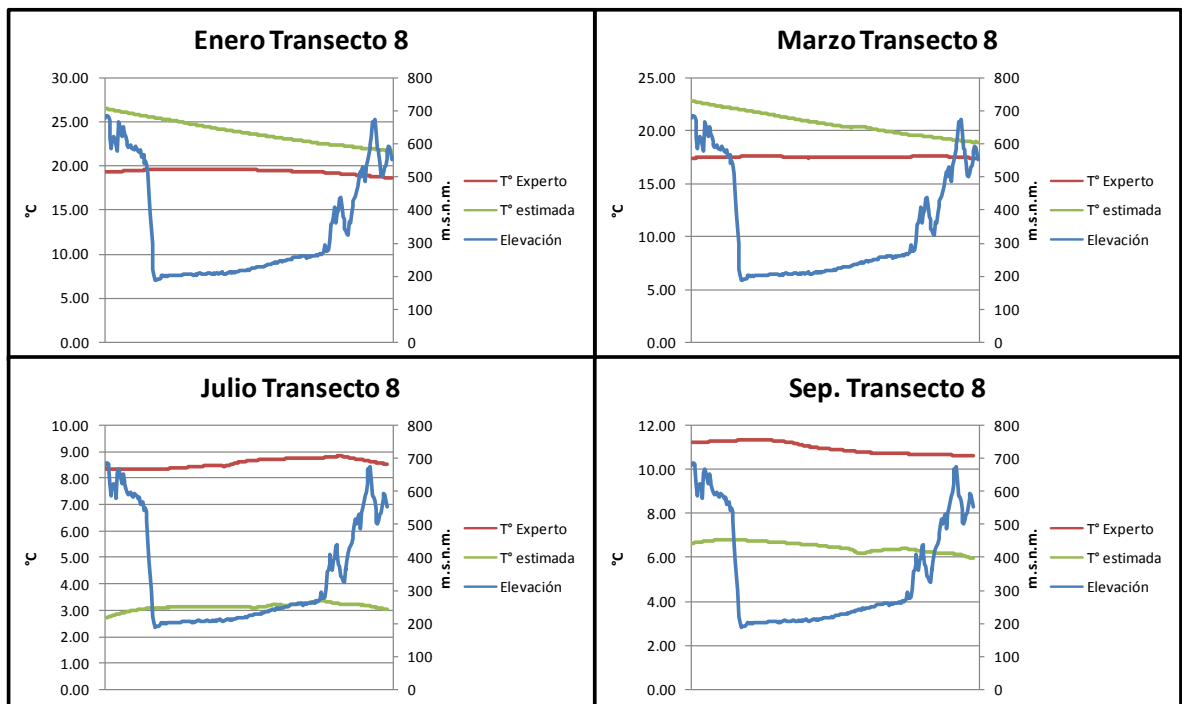


Figura 32. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 8 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 8 tiene una extensión de 31 Km y es representativo del valle central del área de estudio, en donde se aprecia claramente la depresión intermedia entre la cordillera de la costa y la de los Andes.

En el mes de enero se observa un descenso de la temperatura en dirección al oeste, el cual se ve más pronunciado en el mapa obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards,

mientras en el mapa obtenido del trazado experto este descenso en la temperatura es más leve y se observa un pequeño aumento en la parte central del valle.

En el gráfico que muestra el comportamiento de la variable para el mes de marzo, se observa el mismo comportamiento que el que se observó en el mes de enero, con un descenso de la temperatura hacia la precordillera, el que se ve más acentuado en el mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards. En este caso se ve un desplazamiento de ambas curvas hacia abajo, reflejando una mayor disminución en la temperatura de este mes, en comparación con enero, en el mapa obtenido por el modelo que en el mapa obtenido del trazado del experto (ver cuadro 14).

En el mes de julio se ve que la variable en el mapa obtenido por el modelo y en el obtenido del trazado del experto presenta un comportamiento más similar que en los meses anteriores, esto debido a que no se aprecia el descenso abrupto en la temperatura en el mapa obtenido por el modelo para los meses de enero y marzo. En este caso la temperatura es más estable, con una variación menor a 1°C, lo que evidencia el enfriamiento de las zonas bajas disminuyendo la diferencia con las zonas colindantes a la cordillera.

Finalmente, en el mes de septiembre la variable muestra un aumento en la temperatura, el cual es mayor en el primer tramo de la depresión intermedia, lo que muestra que son estas zonas las que empiezan a calentarse más rápidamente hasta alcanzar el patrón observado en enero.

Cuadro 14. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 8.

Transecto 8	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	19,63	26,49	18,57	21,65	19,37	23,81
Marzo	17,63	22,72	17,37	18,83	17,52	20,62
Julio	8,81	3,35	8,33	2,69	8,54	3,12
Septiembre	11,34	6,77	10,58	5,96	10,95	6,46

Fuente: Elaboración propia

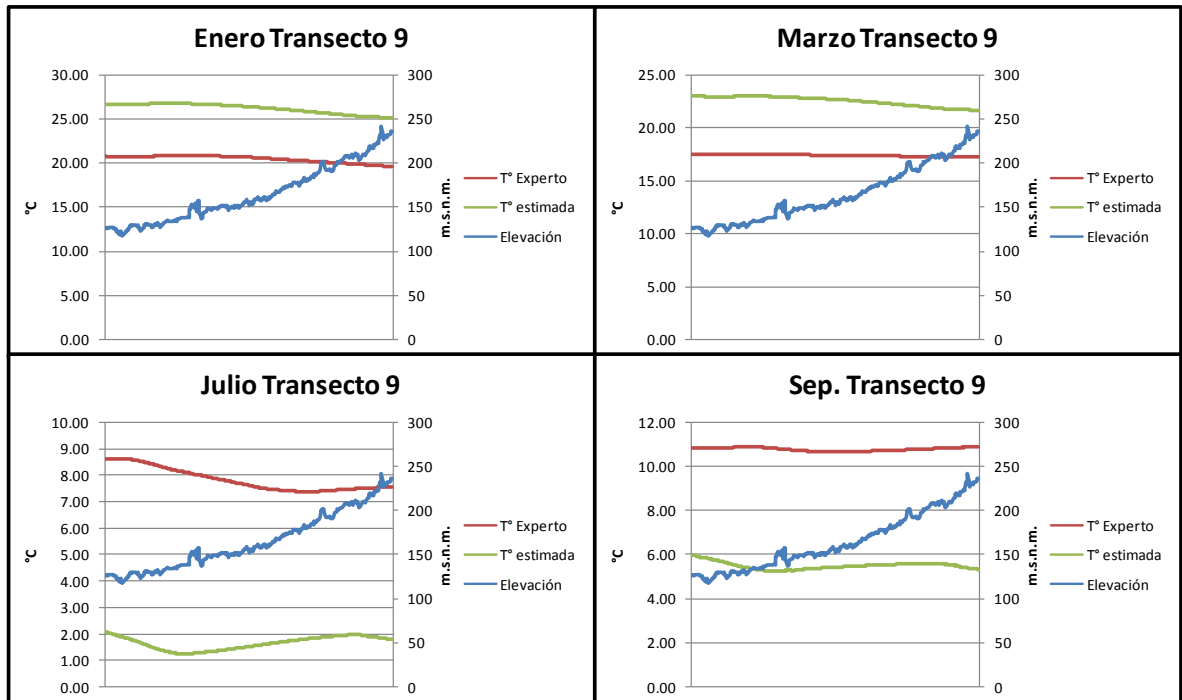


Figura 33. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 9 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 9, al igual que el 8, es representativo de la depresión intermedia. Su extensión es de 40 Km y su elevación varía entre los 117 m.s.n.m. y los 241 m.s.n.m.

En este caso la diferencia el transecto presenta una baja variación en la elevación, siendo su principal característica la variación longitudinal en dirección al este. En cuanto al comportamiento de la variable se observa para el mes de enero como la temperatura disminuye gradualmente a medida que se avanza por el valle central hacia las zonas más cercanas a la cordillera, que es lo que se espera para esta época del año en este transecto. En marzo se puede observar el mismo patrón de comportamiento, aunque con una temperatura más baja.

En julio se observa una disminución de la temperatura del aire en la parte central, debido a que hacia el interior la variación de la temperatura es mayor y se observa un desplazamiento de las masas de aire más cálidas hacia la cordillera. En septiembre este fenómeno empieza a atenuarse debido al aumento en la radiación solar que empieza a calentar nuevamente el valle.

En el cuadro 15 se puede observar que la amplitud térmica en esta zona es mayor que en los transectos anteriores, con una magnitud de 13°C en el mapa obtenido del trazado experto y

de 26°C en el mapa obtenido con el modelo, lo que es propio de la depresión intermedia, en donde existe una gran fluctuación de temperatura a lo largo del año.

Cuadro 15. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 9.

Transecto 9	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	20,86	26,83	19,64	25,08	20,47	26,20
Marzo	17,51	22,97	17,21	21,67	17,37	22,50
Julio	8,59	2,05	7,37	1,21	7,82	1,62
Septiembre	10,88	5,94	10,67	5,26	10,78	5,49

Fuente: Elaboración propia

Se presenta a continuación, en la Figura 34, el comportamiento de la variable temperatura media mensual para el transecto 10.

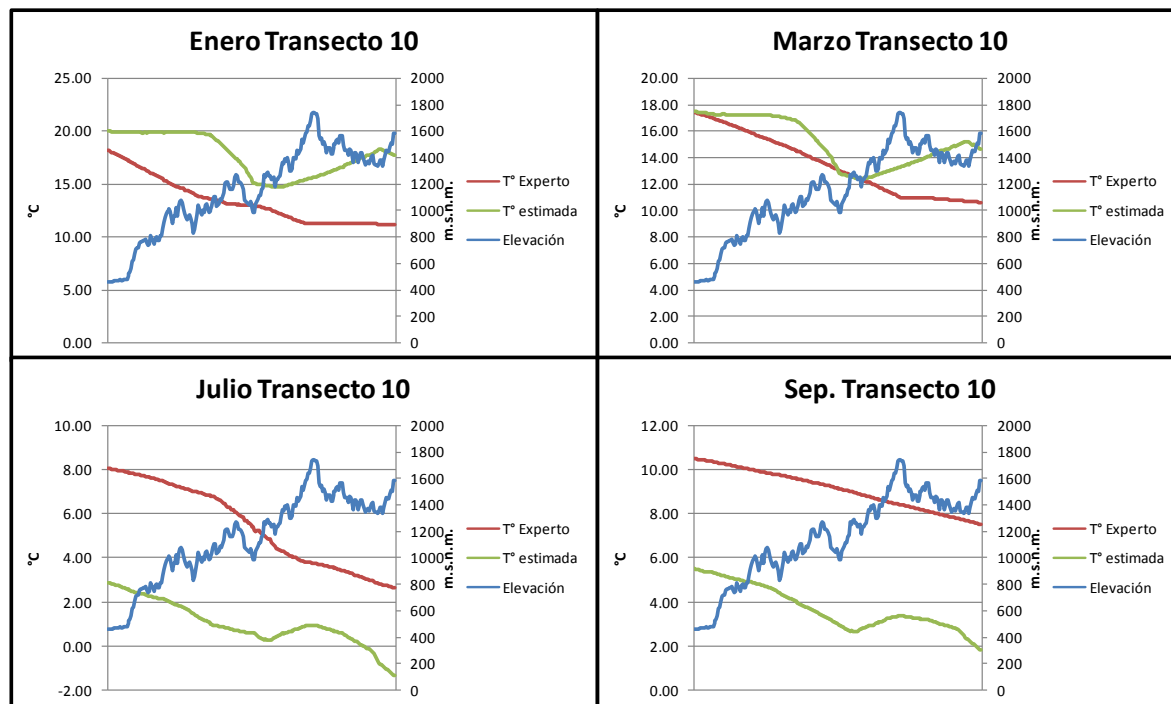


Figura 34. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 10 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 10 representa la transición de la depresión intermedia y la cordillera de los Andes, en donde se aprecia un aumento en la elevación que va desde los 458 m.s.n.m. hasta los 1741 m.s.n.m. en un trayecto de 26 Km.

En este transecto la característica principal es su gradiente altitudinal, por lo que se espera es que la variación en la variable este determinado fuertemente por este factor. Esto es lo que se puede ver en todos los meses en donde la temperatura disminuye notablemente (ver cuadro 16) a medida que aumenta la altura.

En la Figura 34 se puede observar que la curva que describe la variación de la temperatura para los mapas obtenidos con el modelo presenta una variación a la mitad del trayecto que no se observa o no esta tan acentuada en la curva que representa los mapas obtenidos del trazado experto. Esto se puede deber a que en ese punto se genera un cambio en la dirección del transecto, describiendo un giro en dirección al sur muy cerca de un sector de gran altura, lo que provoca este descenso abrupto de la temperatura, la cual aumenta nuevamente debido a la cercanía a un afluente del río Teno.

Cuadro 16. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 10.

Transecto 10	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	18,16	20,03	11,18	14,69	13,31	17,73
Marzo	17,39	17,49	10,55	12,43	13,37	15,14
Julio	8,06	2,86	2,62	-1,37	5,42	0,99
Septiembre	10,47	5,52	7,51	1,81	9,07	3,70

Fuente: Elaboración Propia

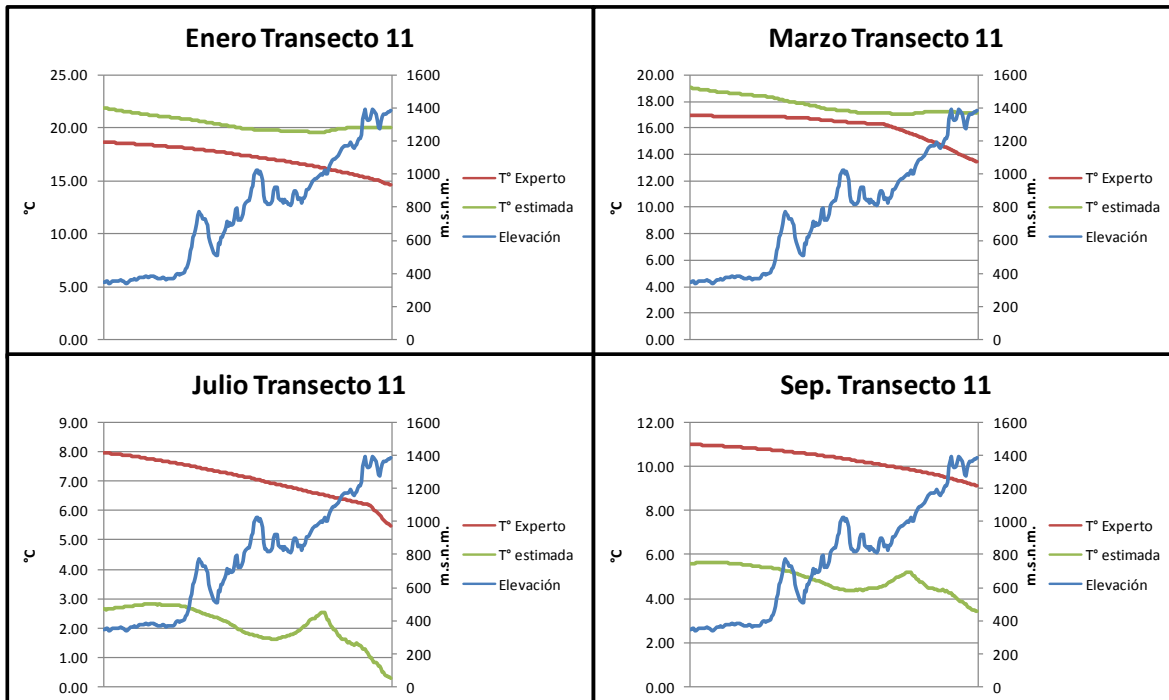


Figura 35. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 11 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 11 tiene una extensión de 26 Km y al igual que el transecto 10 representa el primer tramo de la cordillera de los Andes, ubicado en la parte central del área de estudio, registrando una variación en su elevación que va desde los 338 m.s.n.m. hasta los 1394 m.s.n.m.

Al igual que en el transecto anterior la elevación es el factor principal en la variación de la temperatura media registrada en los cuatro meses, tanto para los mapas obtenidos con el modelos, como los obtenidos del trazado del experto.

El comportamiento de la variable es el esperado en estas condiciones, sin embargo, se observa una anomalía en los meses de julio y septiembre, en donde se observa un aumento abrupto en la temperatura en el tramo final para luego volver a descender a medida que aumenta la elevación. En los meses de enero y marzo el comportamiento de la variable en ambos mapas (obtenido por el modelo y a partir del trazado del experto) es muy similar y solo difieren en el tramo final en donde el experto infiere un descenso más abrupto de la temperatura debido al cambio en la altura, lo que se puede observar también en el cuadro 17.

Cuadro 17. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 11.

Transecto 11	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	18,58	21,87	14,61	19,57	17,11	20,37
Marzo	16,95	19,05	13,41	17,03	16,12	17,72
Julio	7,97	2,80	5,45	0,29	7,05	2,08
Septiembre	11,01	5,61	9,10	3,39	10,31	4,86

Fuente: Elaboración propia

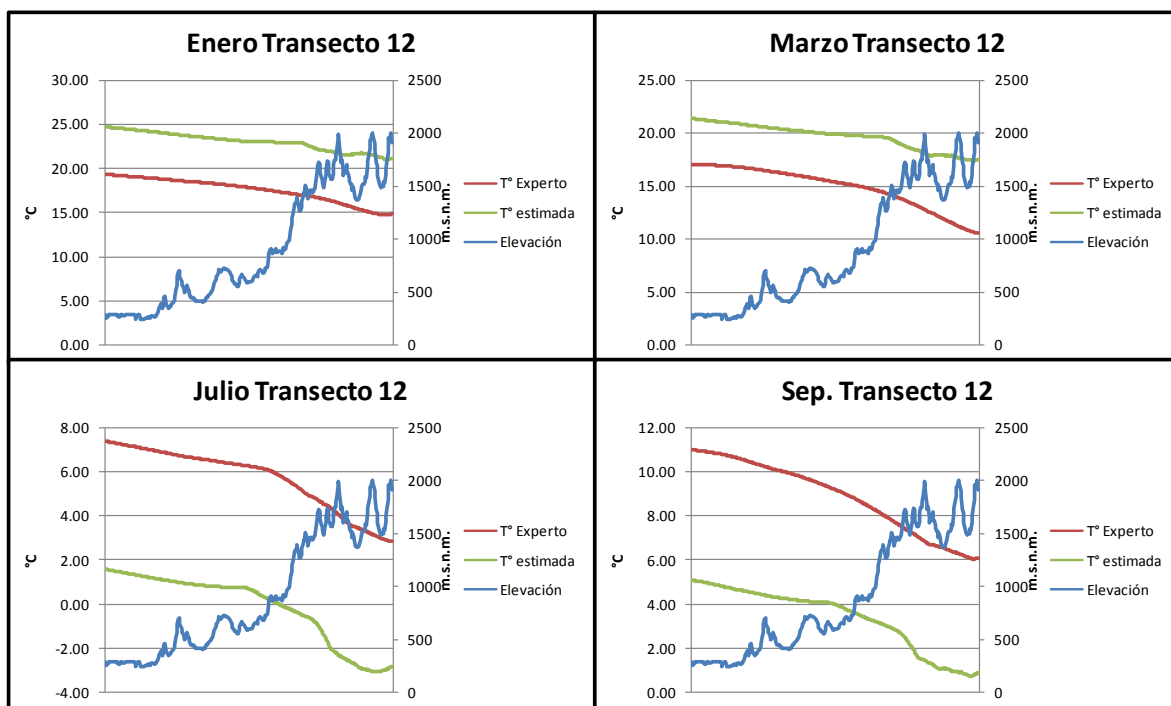


Figura 36. Comportamiento de la temperatura media mensual a lo largo del transecto 12 en el mapa obtenido del trazado del experto y del mapa obtenido por el modelo propuesto por Charles-Edwards, para los meses de enero, marzo, julio y septiembre (Fuente: Elaboración propia).

El transecto 12 es el último de los 3 transectos que representan la topografía de la cordillera de los Andes (transectos 10, 11 y 12), es además el que presenta la mayor elevación alcanzando los 2004 m.s.n.m. Su extensión es de 39 Km y parte desde el último tramo de la depresión intermedia donde su elevación es de 241 m.s.n.m.

En la Figura 36 se observa el comportamiento esperado para este transecto y muy similar en los cuatro meses analizados y en el mapa obtenido del trazado experto y por el modelo, a diferencia de el caso anterior, en donde en julio y septiembre se observó una divergencia entre el experto y el modelo.

El aumento abrupto de la elevación de la mitad hacia adelante del transecto hace disminuir la temperatura de forma considerable. Como se puede ver en el cuadro 18, este descenso de temperatura varía entre los 5°C y 7°C aproximadamente en todos los casos. Además, en la Figura 36 se observa claramente la diferencia entre el sector que tiene influencia de la depresión intermedia y la zona netamente cordillerana, notándose un quiebre en la tendencia, pasando de un tramo con poca variación a un descenso abrupto en el sector cordillerano. Este quiebre se desplaza hacia el interior del valle a medida que se avanza desde el mes más cálido al más frío.

Cuadro 18. Datos estadísticos del comportamiento de la temperatura media mensual para el transecto 12.

Transecto 12	Máxima Experto (°C)	Máxima Estimada (°C)	Mínima Experto (°C)	Mínima Estimada (°C)	Promedio Experto (°C)	Promedio Estimada (°C)
Enero	19,34	24,71	14,80	20,89	17,54	23,00
Marzo	17,00	21,37	10,51	17,35	14,82	19,65
Julio	7,39	1,58	2,84	-3,08	5,69	-0,16
Septiembre	10,98	5,06	6,03	0,70	8,85	3,34

Fuente: Elaboración propia

En los 12 transectos se observó una gran similitud en el comportamiento de la variable en los mapas obtenidos del trazado del experto y de los mapas obtenidos con el modelo propuesto por Charles-Edwards, salvo algunas divergencias particulares, pero en todo el modelo mantuvo la tendencia esperada. Por otra parte, en todos los casos, para los meses de enero y marzo el modelo sobreestimó el valor de la variable, mientras para julio y septiembre lo subestimó, lo que se le puede atribuir como se ha mencionado anteriormente a un sobredimensionamiento de la amplitud térmica utilizada en la ecuación 1.

Como se mostró en el cuadro 3, el promedio de la amplitud térmica es 9,6°C, mientras la diferencia entre la estimación del modelo y los mapas obtenidos a partir del trazado del experto bordea los 5°C. El modelo propuesto por Charles-Edwards suma a la temperatura media anual el valor de la amplitud térmica ponderada por una función senoidal, la cual varía entre 1 y -1 a lo largo del año, ubicando los extremos en el mes más cálido y el más frío.

En base a lo anterior parece lógico la adaptación hecha por Ortiz (2007), en la cual la amplitud térmica es ponderada por 0,5 antes de incluirla en la ecuación 1. Si se hiciera este ajuste, la temperatura en los meses extremos se vería disminuida para enero y aumentada para julio en 5°C aproximadamente, haciéndola mucho más cercana a los valores estimados por el experto.

CONCLUSIONES

En cuanto a la distribución espacio-temporal de la variable temperatura media mensual, estimada mediante el método propuesto por Charles-Edwards, se puede concluir que este preserva gran parte del comportamiento inferido por el experto. Sin embargo, existen condiciones específicas particulares presentes en los meses intermedios que el modelo no es capaz de dar cuenta.

El modelo propuesto por Charles-Edwards tiene la ventaja de ser un modelo simple que no requiere invertir grandes recursos, ya que puede ser programado en cualquier computador personal disponible en la actualidad, el tiempo de procesamiento es bajo y las variables de entrada son generalmente asequibles. Sin embargo, en condiciones particulares del terreno no logra replicar detalladamente el patrón de comportamiento inferido por el experto.

La mayor similitud en el comportamiento de la variable temperatura media mensual para los meses de enero y julio, entre los estimados por el modelo propuesto por Charles-Edwards y los obtenidos del trazado experto observada en el análisis de los trazados hipsométricos, se puede atribuir a que en el modelo la variable amplitud térmica y temperatura media anual se obtuvieron a partir de los mapas de esos meses trazados por el experto.

En cuanto al error cuadrático medio, se concluye que el error en la estimación, en relación a los mapas trazados por el experto, son considerables a nivel biológico, por lo que no es recomendable utilizar los valores de temperatura media mensual obtenidos en este estudio como una aproximación cercana los mapas que pudiesen ser trazados por el experto.

En los cuatro meses analizados se puede observar, en el análisis de similaridad cartográfica, que en todos los casos las mayores similitudes relativas, en cuanto al valor de la variable, se presentan en el sector de la costa y precordillera, mientras los valores más bajos se encuentran en el sector del valle, salvo en partes del mapa correspondiente al mes de septiembre. Este comportamiento se atribuye a una mayor variabilidad de la temperatura media mensual en la depresión intermedia que en las zonas en las que se apreció una mayor similaridad relativa.

Debido a que, en cuanto al comportamiento espacio-temporal de la variable, el modelo presentó resultados satisfactorios, la posibilidad de utilizarlo como interpolador temporal a partir del trazado experto de los meses extremos en zonas con baja densidad de estaciones meteorológicas es cierta, siempre y cuando se realicen ajustes que disminuyan el error en la estimación del valor de la variable, como pueden ser ajustar un factor de corrección a la amplitud térmica.

BIBLIOGRAFÍA

Berry, J.K. 2002. Quantitative Methods for Analyzing Map Similarity and Zoning. Proceedings of GeoTech Conference on Geographic Information Systems, Toronto, Ontario, Canadá.

Bustamante, J. 2003. Cartografía predictiva de variables climáticas: Comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular. Revista Graellsia, España. 59(2-3): 359-376 pp.

Castellvi, F. y F. Castillo. 2001. Agrometeorología. Mundi Prensa Libros. España. 517 pp.

Charles-Edwards, D. 1982. Physiological determinants of crops growth. Academic Press Australian. 161 p.

Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. Ariel ciencias. España 492-499 pp.

Daly, C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data set. International journal of climatology. 26: 707-721 pp.

Daly, C., P. Wayne, G. Gibson, G. Taylor, P. Johnson, 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. Climate research. 22: 99-113pp.

Di Castri, F. y E. Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Vicerrectoría Académica de la Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 161p.

Díaz, D. 2006. Elaboración y ajuste de modelos topoclimáticos de variables termoplumiométricas, para las VIII, IX y X regiones de Chile. Memoria de Título Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas.

Dourado-Neto, D., D. A. TERUEL, K. REICHARDT, D.R. NIELSEN³; J. A. FRIZZONE, O.O.S. BACCHI. 1998. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. Scientia Agricola. 55: 46-50.

Errázuriz, A., J. González, M. Henríquez, P. Cereceda, M. González y R. Rioseco. 1992. Manual de geografía de Chile. Editorial Andrés Bello, Santiago, Chile. 415p.

Ferrer, F.J., P.G. Cabrera, A. García y J.P. de Nicolás. S.a. Metodología sobre cartografía bioclimática. Disponible en:
<http://webpages.ull.es/users/fjferrer/Bibliog/Biblio/METODO%20CARTOGR%20BIOCL>. PDF. Leído el 15 de julio del 2010.

Ibañez, M. y J. Rosell. 2001. Interpolación espacial de la temperatura del aire incorporando imágenes AVHRR. Teledetección, medio ambiente y cambio global. 405-408 pp.

IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

Kurtzman, D., R. Kadmon, 1999. Mapping of temperature variables in Israel: a comparison of different interpolation methods. *Climate Research*. 13: 33-43 pp.

Lopez, J., J. Sanchez, R. Andressen. 2001. Comparación de varios métodos para la representación cartográfica de información climática en zonas altas del Estado Lara. *Bioagro*. 13: 39-46 pp.

Ortiz, C., Ma. Del Carmen Gutiérrez, 2007 Estimación de la temperatura media anual en México. *Geografía Agrícola*. 38: 7-18 pp.

Price, D., D. McKenney, I. Nalder, M. Hutchinson y J. Kesteven, 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 101: 81-94 pp.

Sanchez, A. y R. Morales, 1990. Las Regiones de Chile. Editorial universitaria. 139-160 pp.

Santibañez F., J. Uribe. 1993. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones VI, VII, VIII y IX. Santiago, Universidad de Chile. Ministerio de Agricultura. 99p.

Shao Q., K. Rong, W.W. Ma, Z.Q. Chen. 2007. Generating time-series grid data of sea surface temperature from isotherms in the Northwestern Pacific Ocean using coupled interpolation. *Deep-Sea Research*. 54:673-686 pp.

Sibson R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation, en *Interpreting Multivariate Data*. V. Barnett, ed. New York. 21-36 pp.

SINIA. Sa Cartografía base de Chile. Disponible en: <http://territorial.sinia.cl/portal/descargas.php>. Leído el 3 de febrero del 2012.

Stahl K., R. Moor, J. Floyer, M. Asplin y I. McKendry, 2006. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. *Agricultural and Forest Meteorology*. 139: 224-236 pp.

Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F y Ferres, E. 2002. Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola. Editorial Mundi-Prensa. 496 p.

Wang, Y. y S. Hou, 2009. A new interpolation method for Antarctic surface temperature. *Progres un Natural Scince*. 19: 1843-1849 pp.

ANEXO I

Mapas de temperaturas máximas y mínimas obtenidos a partir del trazado experto.

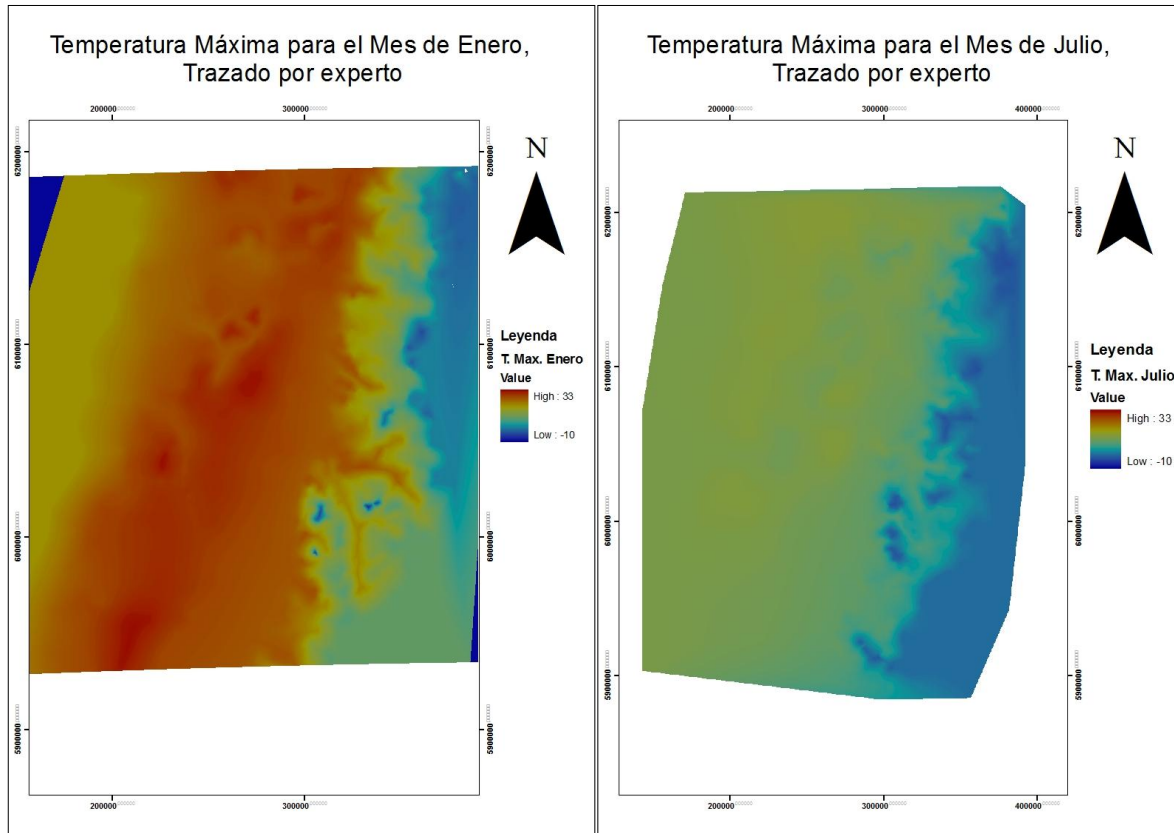


Figura 37. Mapa de temperatura máxima para el mes de enero (izquierda) y julio (derecha) obtenidos del trazado experto (Fuente: Elaboración propia a partir de trazado experto).

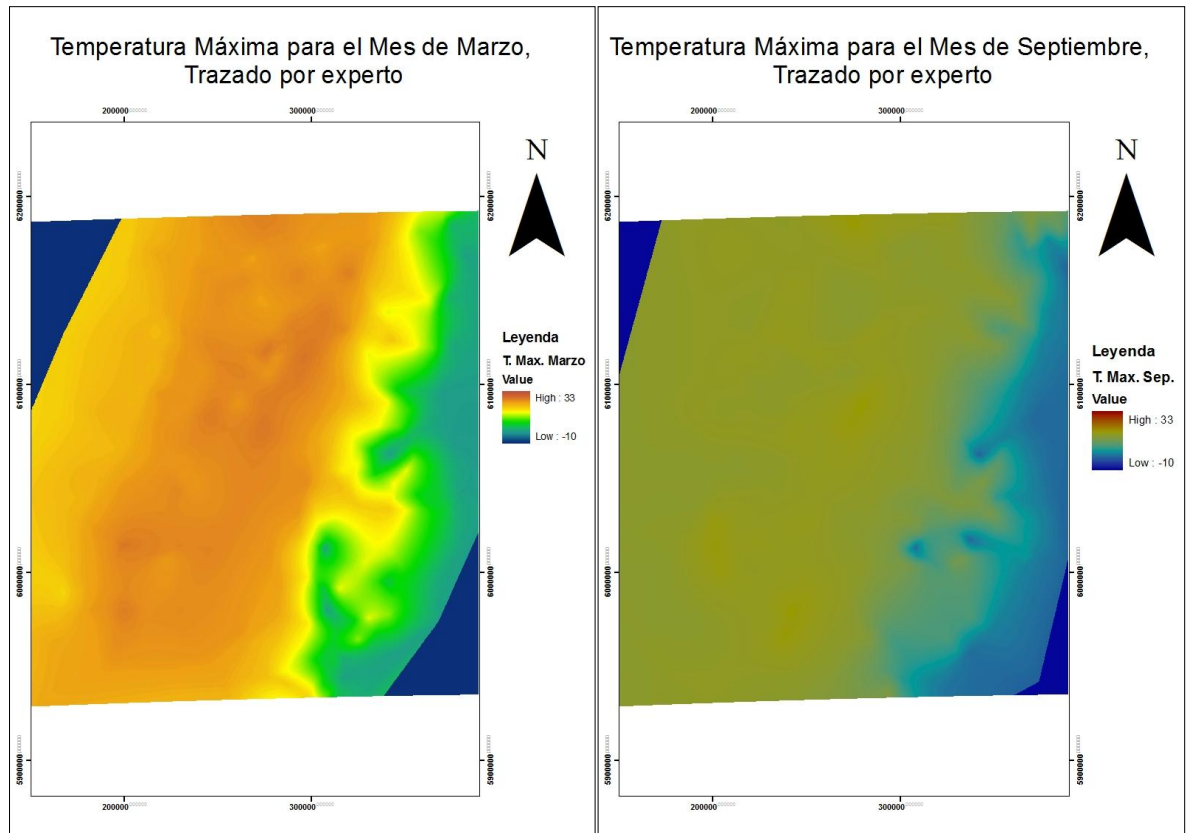


Figura 38. Mapa de temperatura máxima para el mes de marzo (izquierda) y septiembre (derecha) obtenidos del trazado experto (Fuente: Elaboración propia a partir de trazado experto (Fuente: Elaboración propia a partir de trazado experto)).

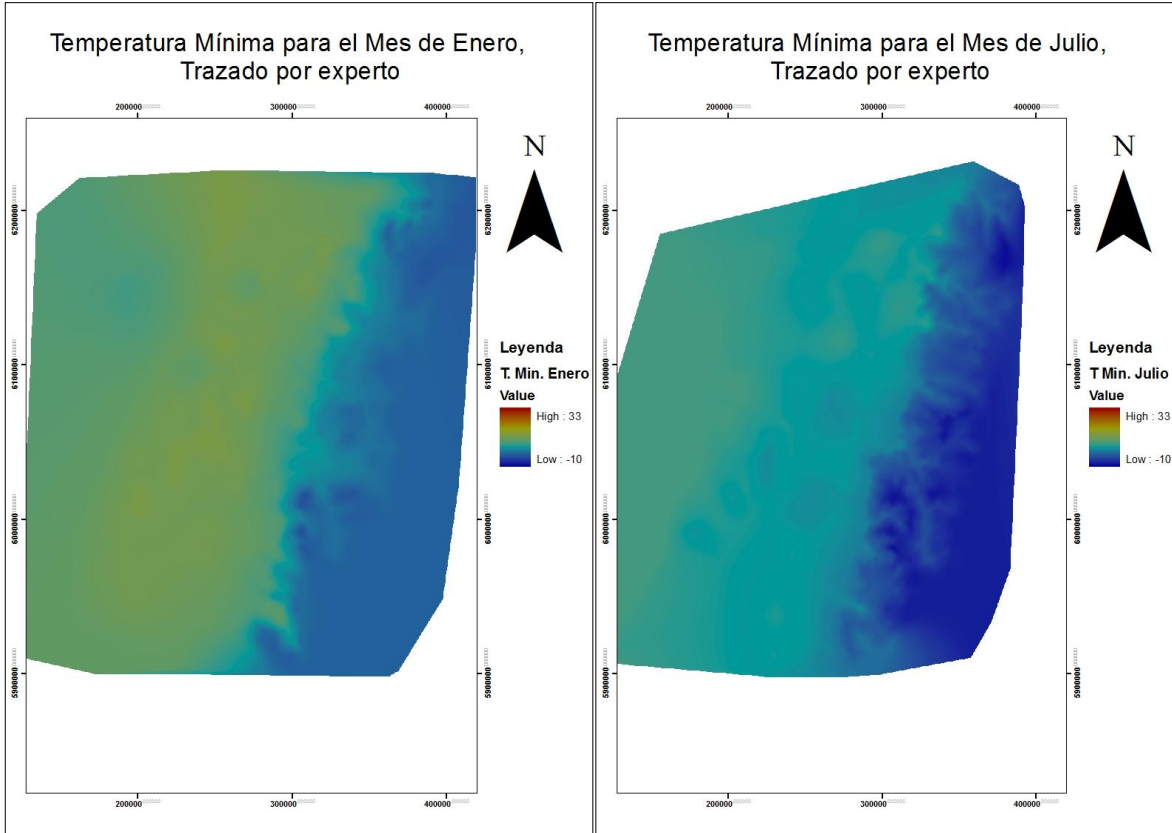


Figura 39. Mapa de temperatura mínima para el mes de enero (izquierda) y julio (derecha) obtenidos del trazado experto (Fuente: Elaboración propia a partir de trazado experto).

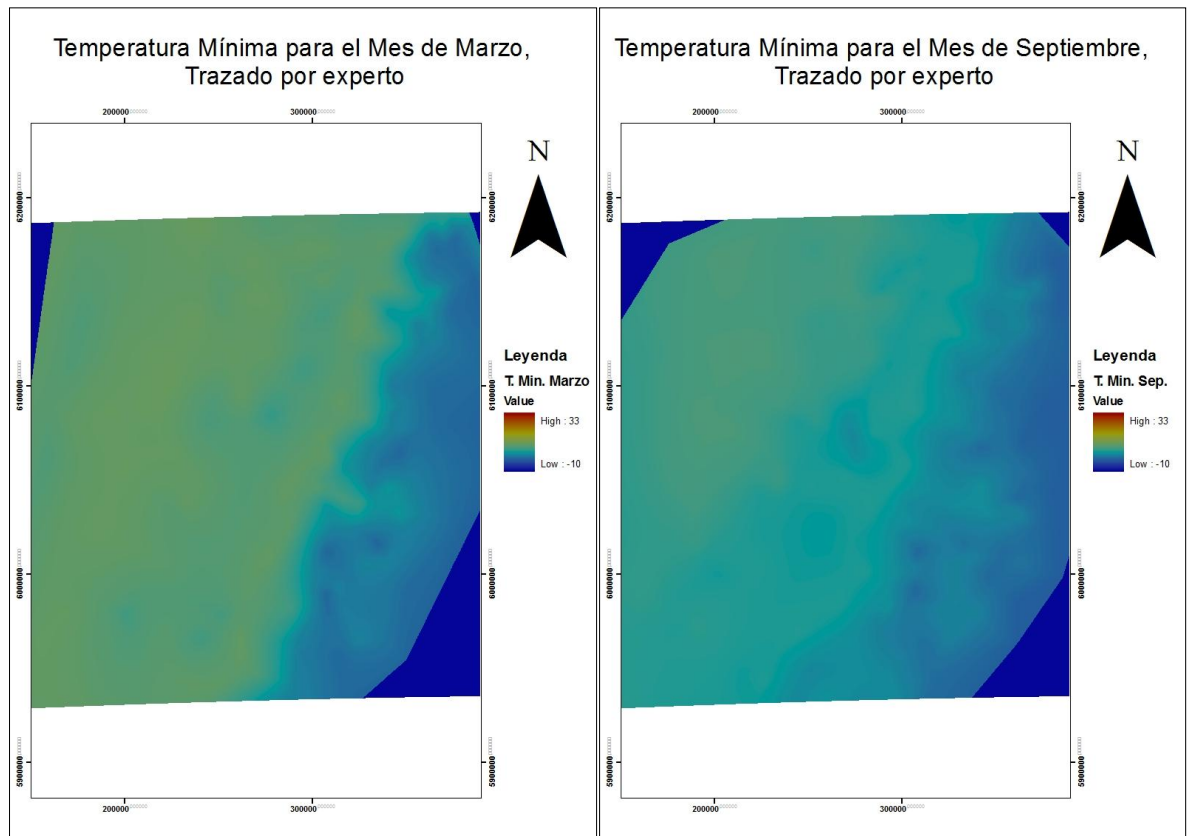


Figura 40, Mapa de temperatura mínima para el mes de marzo (izquierda) y septiembre (derecha) obtenidos del trazado experto (Fuente: Elaboración propia a partir de trazado experto).

APÉNDICE I

Programación en lenguaje "Visual Basic" del modelo propuesto por Charles-Edwards, utilizada en la elaboración de los mapas de temperatura media diaria y mensual.

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
fila = 2791
colu = 2881
dji = Cells(2, 2)
djf = Cells(3, 2)
```

```
ReDim TD(fila, colu) As Single 'TD es la amplitud térmica
ReDim TMA(fila, colu) As Single 'TMA es la temperatura media anual
ReDim LAT(fila, colu) As Single 'LAT es el mapa con la latitud de cada pixel
ReDim Z(fila, colu) As Single
Dim DZ As Single
Dim amplitud As Single
Dim Manual As Single
Dim latitud As Single
Dim TMD As Single
```

```
Filename1$ = "C:\MDT_Temp_2\TD.rst" 'TD_latlon es el raster con la amplitud
termica
```

```
Open Filename1$ For Binary As #1
```

```
Filename2$ = "C:\MDT_Temp_2\TMA.rst" ' TMA_LATLONG el el raster con la
TMA
```

```
Open Filename2$ For Binary As #2
```

```
Filename3$ = "C:\MDT_Temp_2\latitud.rst" ' latitud es el raster con la latitud
```

```
Open Filename3$ For Binary As #3
```

```
Filename4$ = "C:\MDT_Temp_2\Z.rst" ' Parametro Z, Dia de equinoccio otoño
```

```
Open Filename4$ For Binary As #4
```

```
For i = 1 To fila
```

```
For j = 1 To colu
```

```
Get #1, , amplitud
```

```
TD(i, j) = amplitud
```

```
Get #2, , Manual
```

```
TMA(i, j) = Manual
```

```

    Get #3, , latitud
    LAT(i, j) = latitud

    Get #4, , DZ
    Z(i, j) = DZ

    Next j
  Next i
Close #1
Close #2
Close #3
Close #4

For k = dji To djf 'dia juliano

mini = 9999999#
maxi = -999999#
TMD = 0

  Filename5$ = "C:\MDT_Temp_2\TMD\TMD_" + Trim(k) + ".rst"
  Open Filename5$ For Binary As #5

    For i = 1 To fila
      For j = 1 To colu

        TMD = TMA(i, j) + TD(i, j) * Sin((2 * 3.1415 * (k + Z(i, j) + (LAT(i, j) / 2))) /
365)

        Put #5, , TMD

        If TMD < mini Then mini = TMD
        If TMD > maxi Then maxi = TMD

      Next j
    Next i

  Filename6$ = "C:\MDT_Temp_2\TMD\TMD_" + Trim(k) + ".rdc"

```

Open Filename6\$ For Output As #6

Print #6, "file format : IDRISI Raster A.1"
Print #6, "file Title : TMD" + Trim(k)
Print #6, "data type : real"
Print #6, "file type : binary"
Print #6, "columns : 2881"
Print #6, "rows : 2791"
Print #6, "ref.system : latlong"
Print #6, "ref.units : deg"
Print #6, "unit dist. : 1.0000000"
Print #6, "min. X : -72.9838486"
Print #6, "max. X : -70.0542068"
Print #6, "min. Y : -36.7235184"
Print #6, "max. Y : -34.4022408"
Print #6, "pos 'n error: unknown"
Print #6, "resolution : unknown"
Print #6, "min. value : " + Trim(mini)
Print #6, "max. value : " + Trim(maxi)
Print #6, "display min : " + Trim(mini)
Print #6, "display max : " + Trim(maxi)
Print #6, "Value units : unspecified"
Print #6, "Value Error : unknown"
Print #6, "flag Value : none"
Print #6, "flag def 'n : none"
Print #6, "legend cats : 0"
Print #6, "lineage : Por Felipe Hernandez Mora"
Print #6, "lineage : Por Felipe Hernandez Mora"

Close

Next k

End Sub

```

Private Sub CommandButton1_Click()
fila = 2791
colu = 2881

ReDim TMM(fila, colu) As Single
ReDim suma(fila, colu) As Single
Dim promedio As Single
dji = Cells(4, 2)
djf = Cells(5, 2)
mes$ = Cells(3, 2)
Dim Mmes As Single

mini = 99999999
maxi = -99999999

Filename2$ = "C:\MDT_Temp_2\TMM_vb\TMM_" + Trim(mes$) + ".rst"
Open Filename2$ For Binary As #2
For k = dji To djf
    g = g + 1
    Filename1$ = "C:\MDT_Temp_2\TMD\TMD_" + Trim(k) + ".rst"
    Open Filename1$ For Binary As #1

        For i = 1 To fila
            For j = 1 To colu
                Get #1, , Mmes

                TMM(i, j) = Mmes

            Next j
        Next i
    Close #1

        For i = 1 To fila
            For j = 1 To colu
                suma(i, j) = suma(i, j) + TMM(i, j)
            promedio = suma(i, j) / g

            Put #2, , promedio
            If promedio < mini Then mini = promedio
            If promedio > maxi Then maxi = promedio
        Next j
    Next i

```

Next k

```
Filename3$ = "C:\MDT_Temp_2\TMM_vb\TMM_" + Trim(mes$) + ".rdc"  
Open Filename3$ For Output As #3
```

```
Print #3, "file format : IDRISI Raster A.1"  
Print #3, "file Title : TMM_" + Trim(mes)  
Print #3, "data type : real"  
Print #3, "file type : binary"  
Print #3, "columns : 2881"  
Print #3, "rows : 2791"  
Print #3, "ref.system : latlong"  
Print #3, "ref.units : deg"  
Print #3, "unit dist. : 1.0000000"  
Print #3, "min. X : -72.9838486"  
Print #3, "max. X : -70.0542068"  
Print #3, "min. Y : -36.7235184"  
Print #3, "max. Y : -34.4022408"  
Print #3, "pos 'n error: unknown"  
Print #3, "resolution : unknown"  
Print #3, "min. value : " + Trim(mini)  
Print #3, "max. value : " + Trim(maxi)  
Print #3, "display min : " + Trim(mini)  
Print #3, "display max : " + Trim(maxi)  
Print #3, "Value units : unspecified"  
Print #3, "Value Error : unknown"  
Print #3, "flag Value : none"  
Print #3, "flag def 'n : none"  
Print #3, "legend cats : 0"  
Print #3, "lineage : Por Felipe Hernandez Mora"  
Print #3, "lineage : Por Felipe Hernandez Mora"
```

Close

End Sub

APÉNDICE II
Mapas de temperatura media mensual obtenidos con el modelo propuesto por
Charles-Edwards.

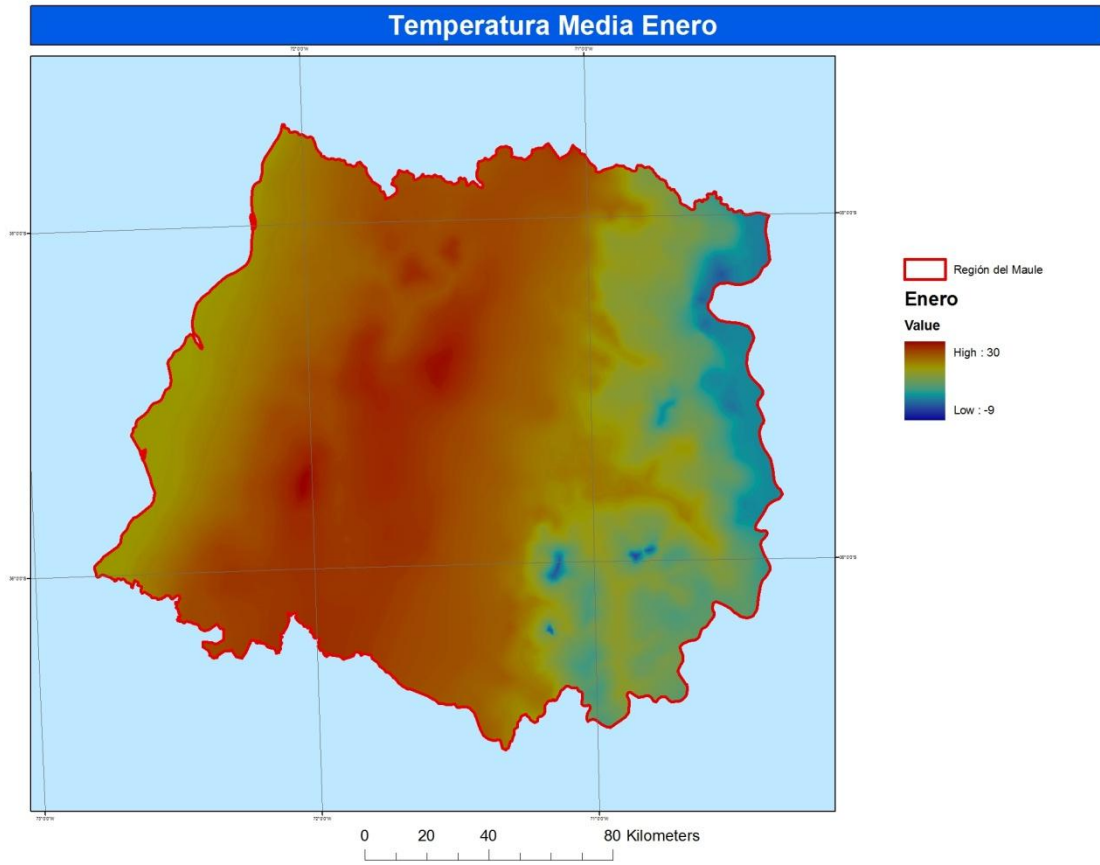


Figura 41. Mapa de temperatura media del mes de enero obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

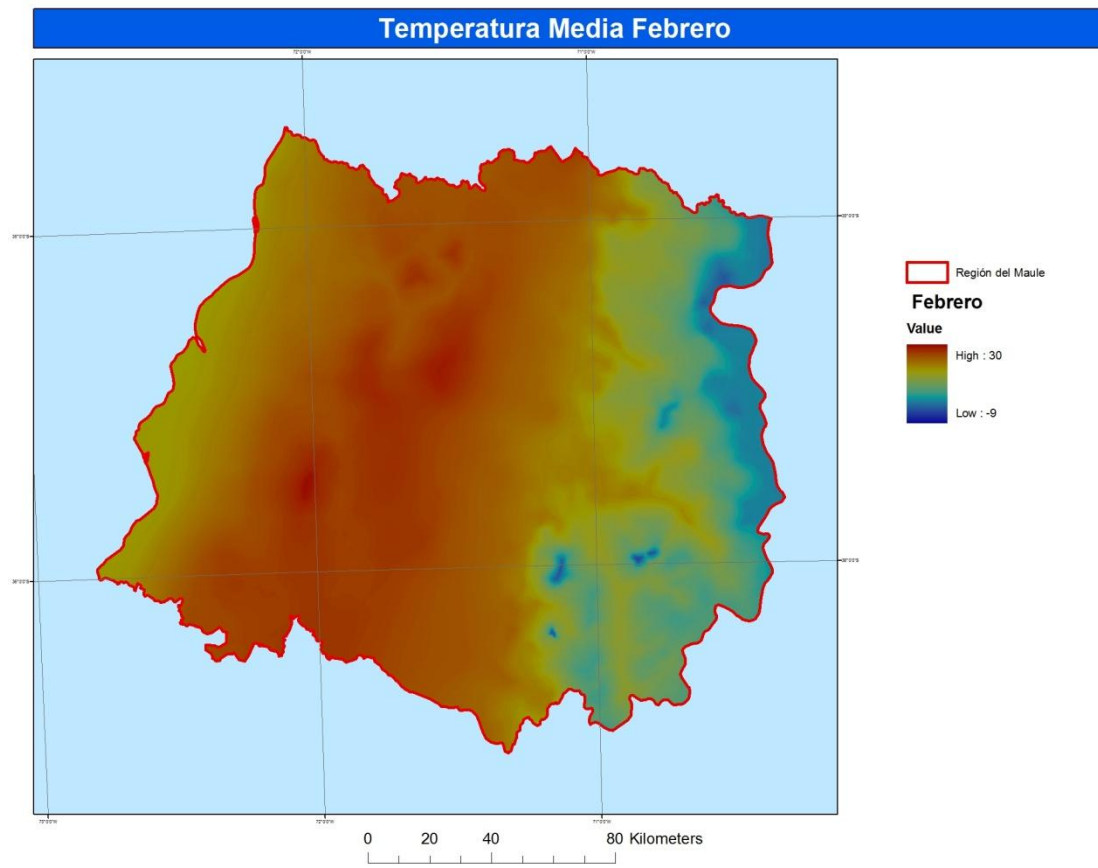


Figura 42. Mapa de temperatura media del mes de febrero obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

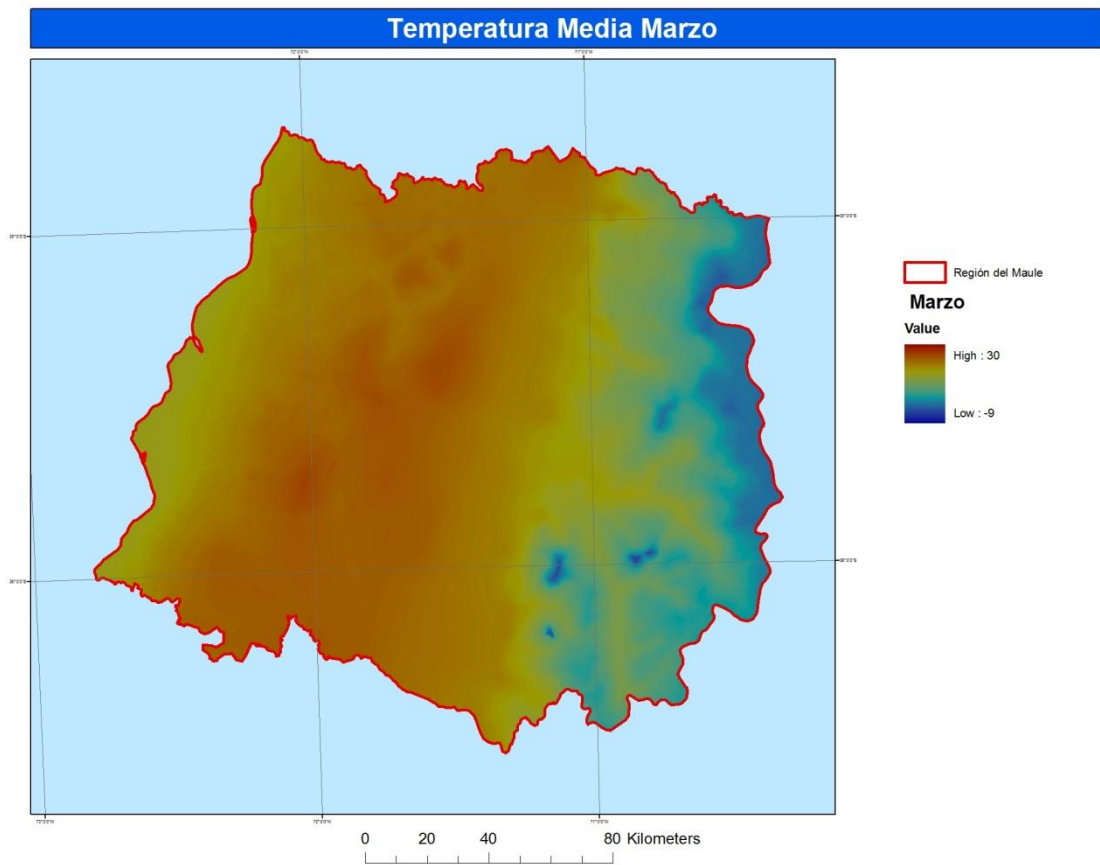


Figura 43. Mapa de temperatura media del mes de marzo obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

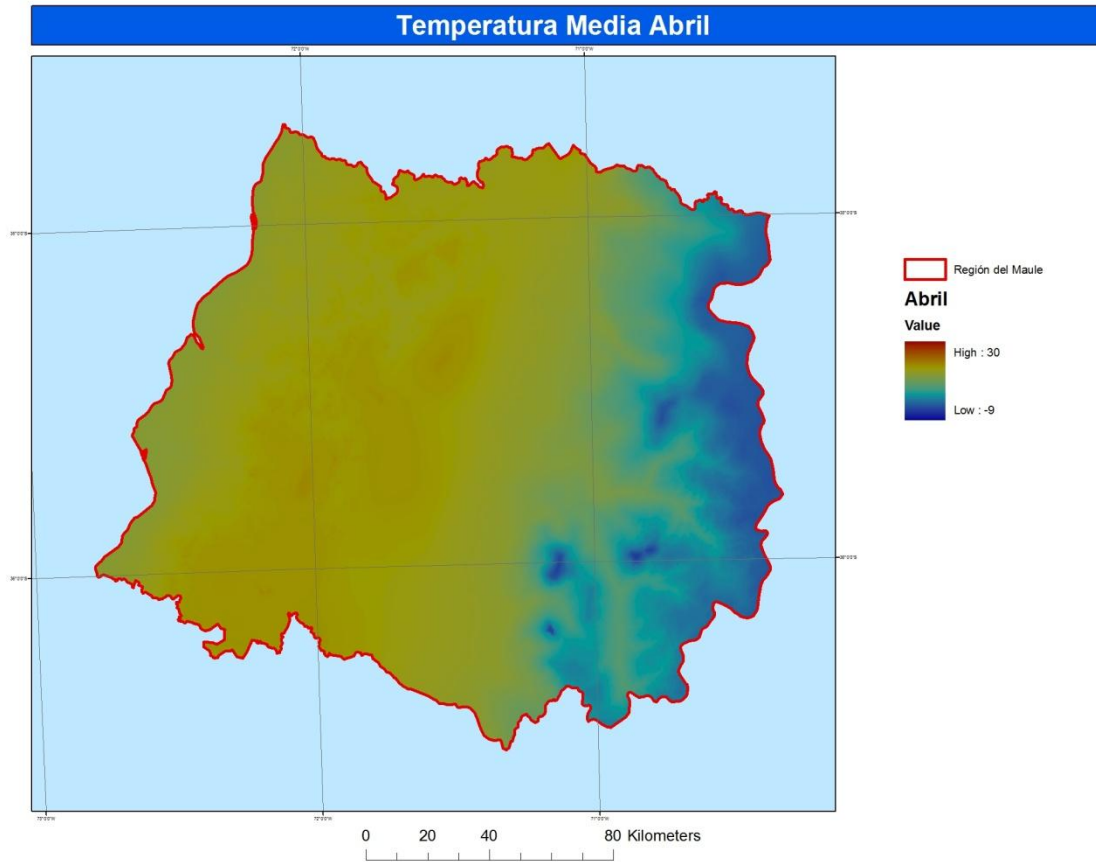


Figura 44. Mapa de temperatura media del mes de abril obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards.

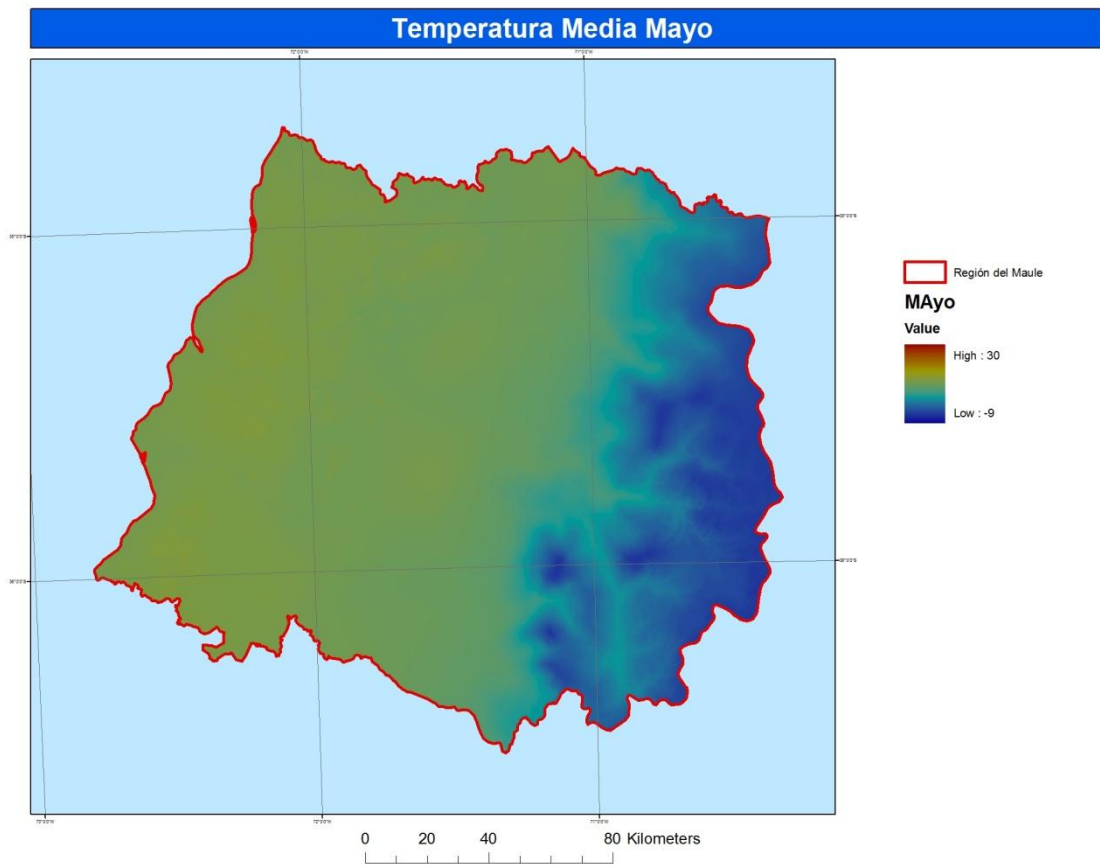


Figura 45. Mapa de temperatura media del mes de mayo obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

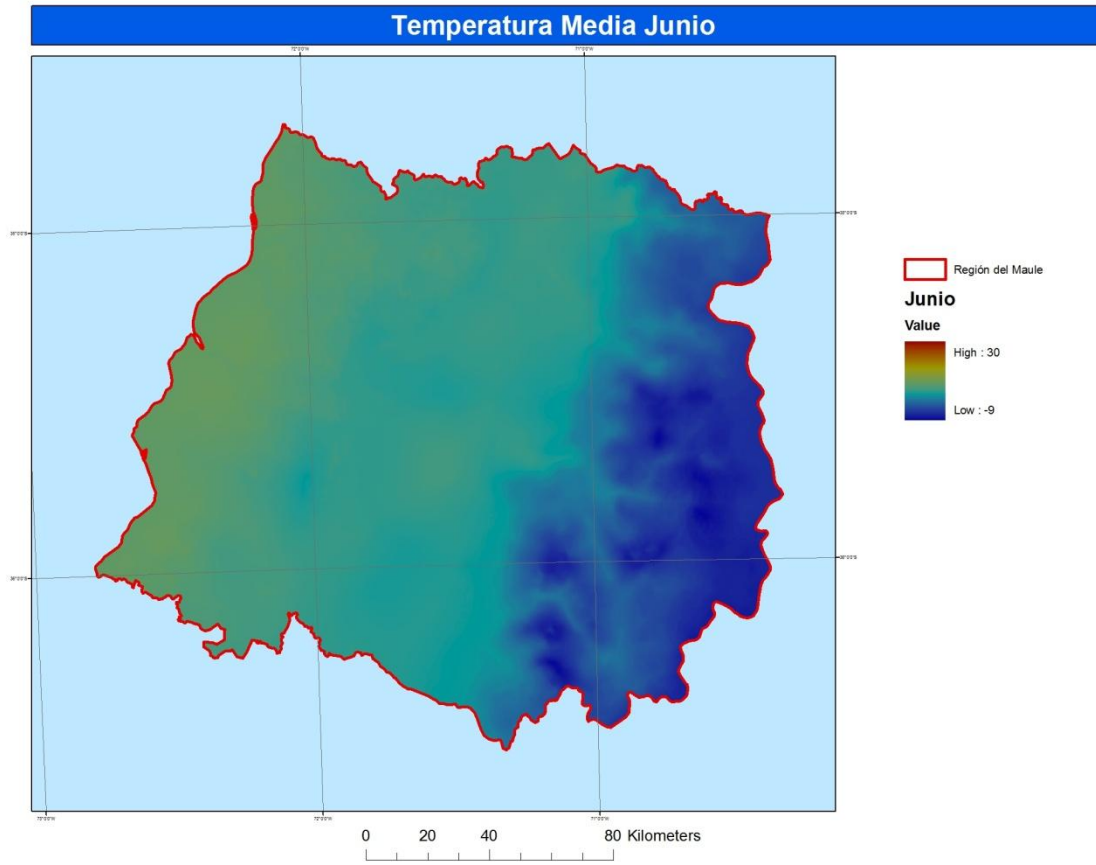


Figura 46. Mapa de temperatura media del mes de junio obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

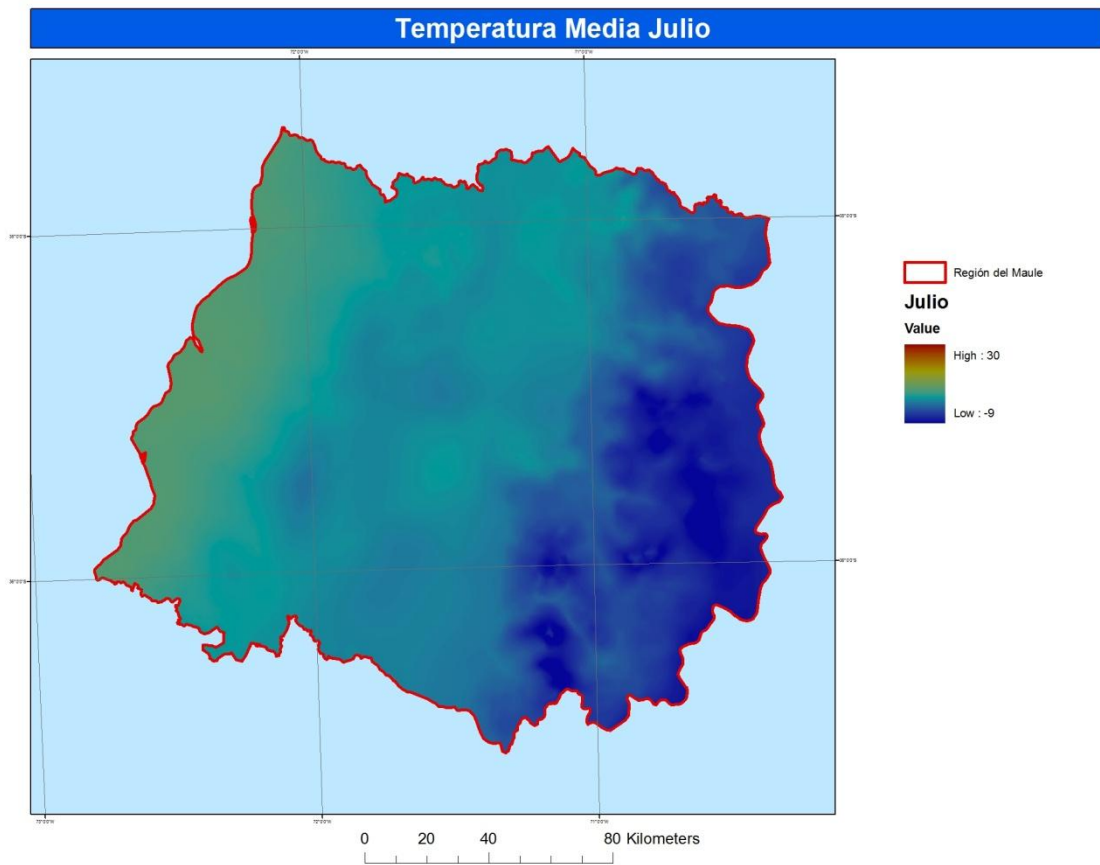


Figura 47. Mapa de temperatura media del mes de julio obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

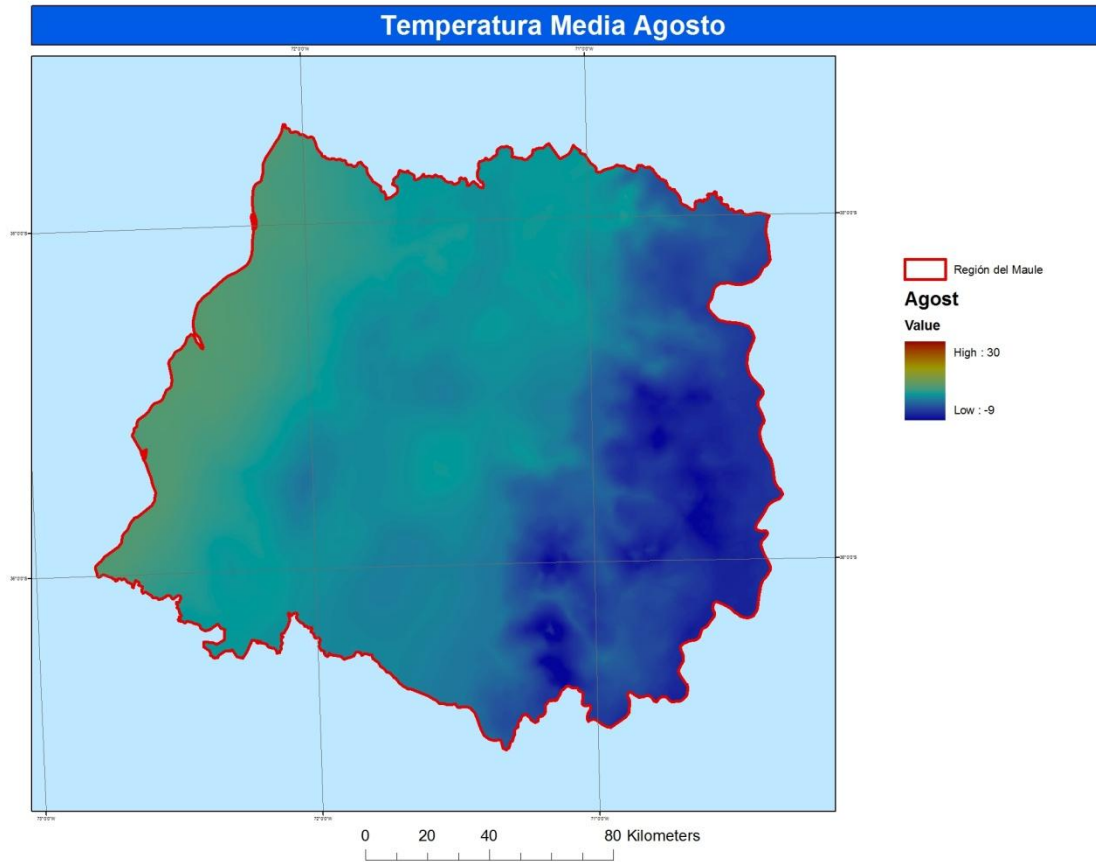


Figura 48. Mapa de temperatura media del mes de agosto obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

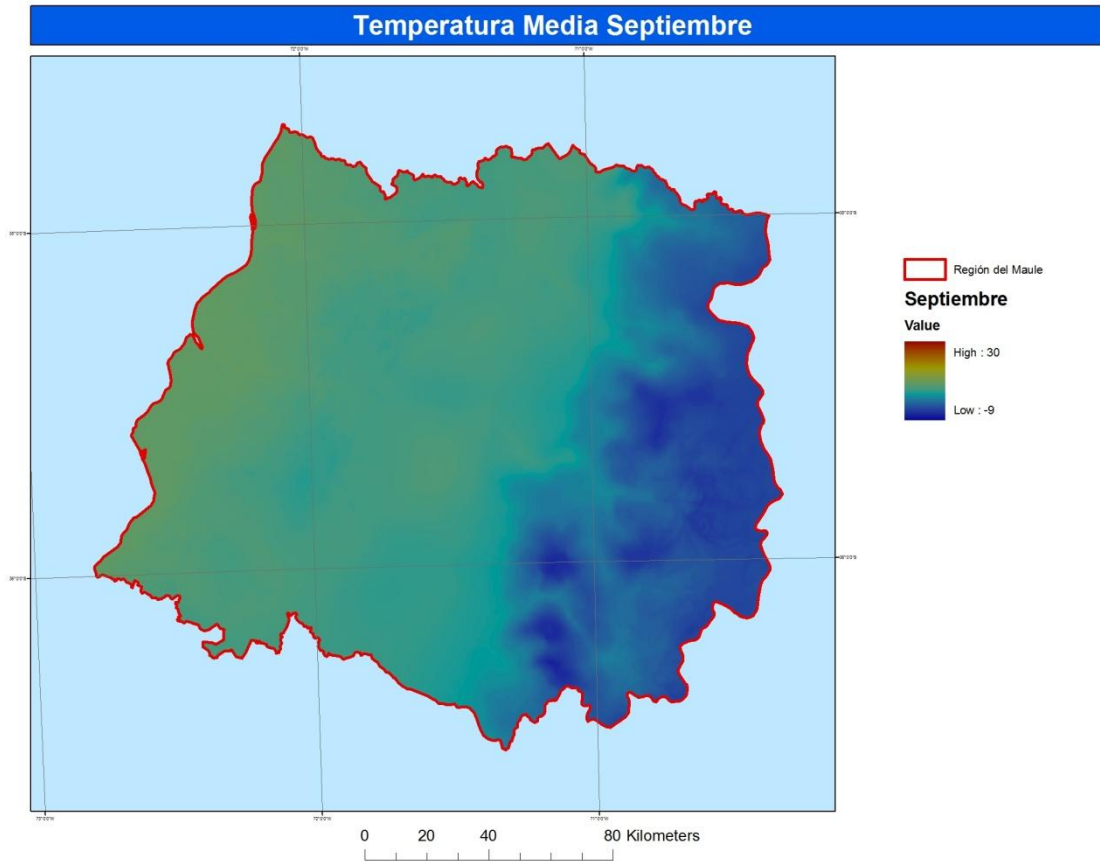


Figura 49. Mapa de temperatura media del mes de septiembre obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

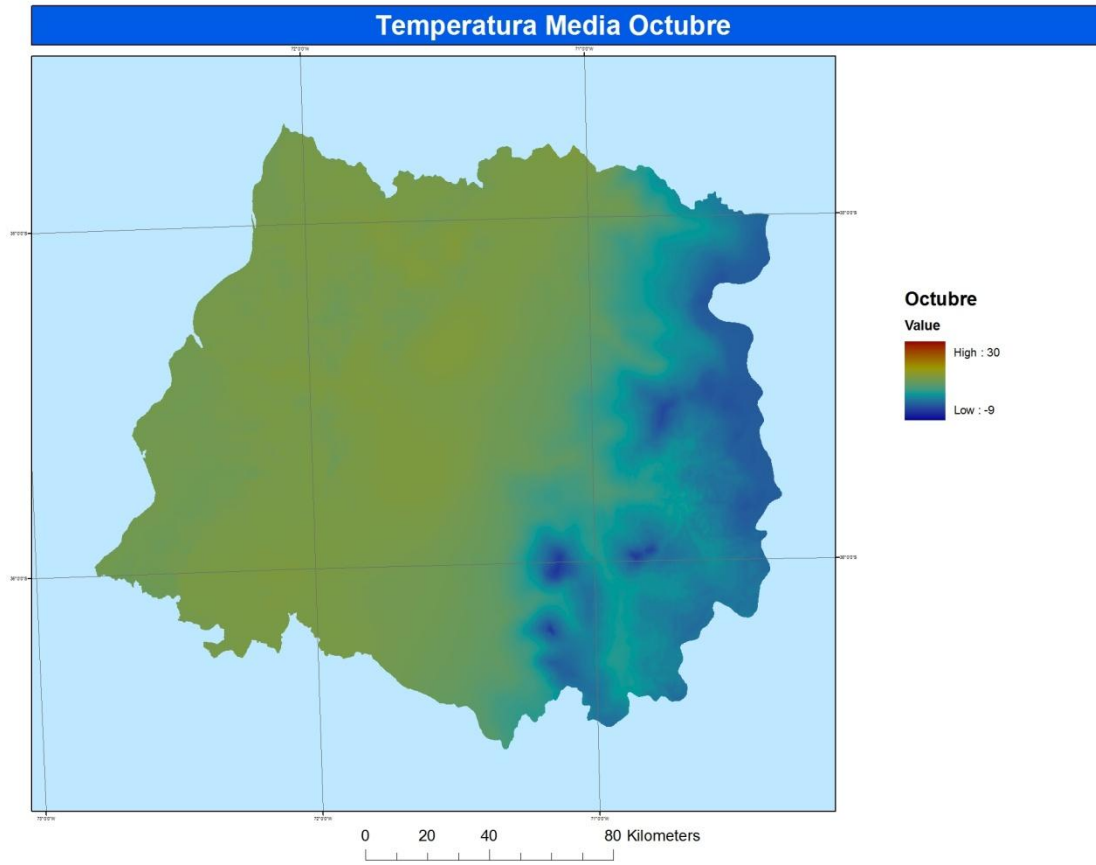


Figura 50. Mapa de temperatura media del mes de octubre obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

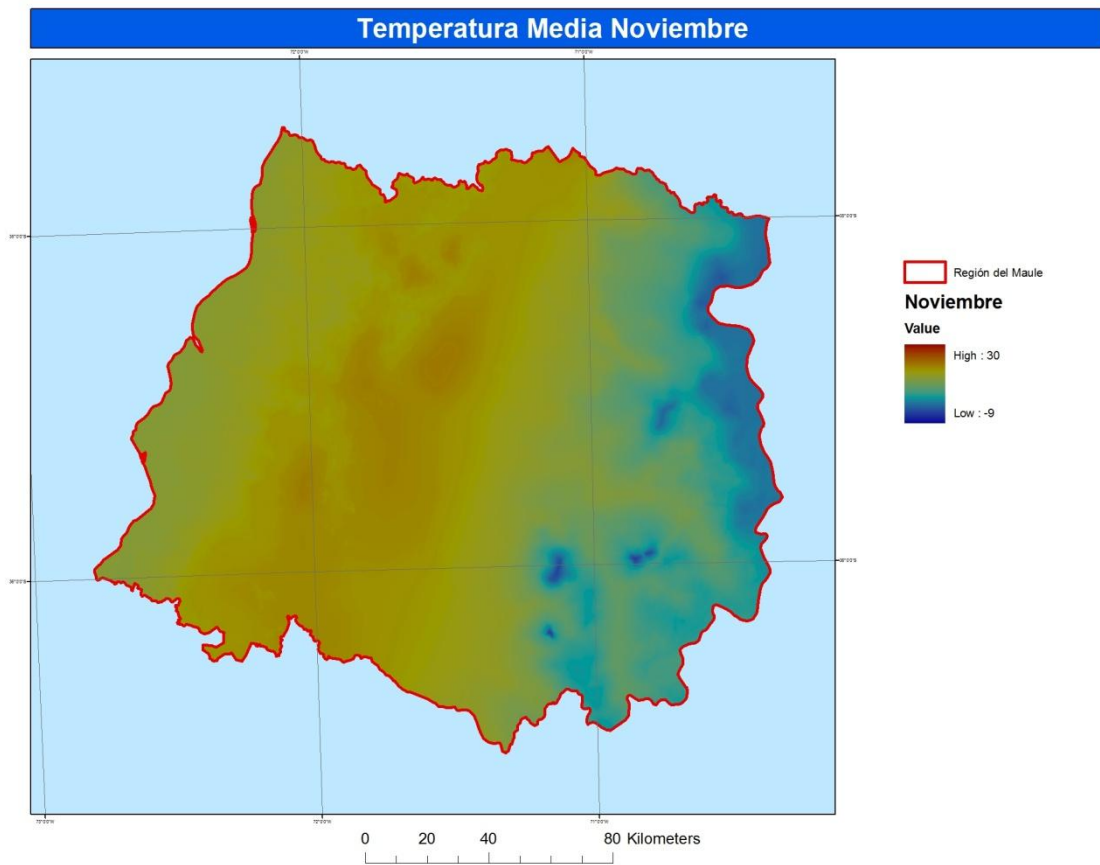


Figura 51. Mapa de temperatura media del mes de noviembre obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).

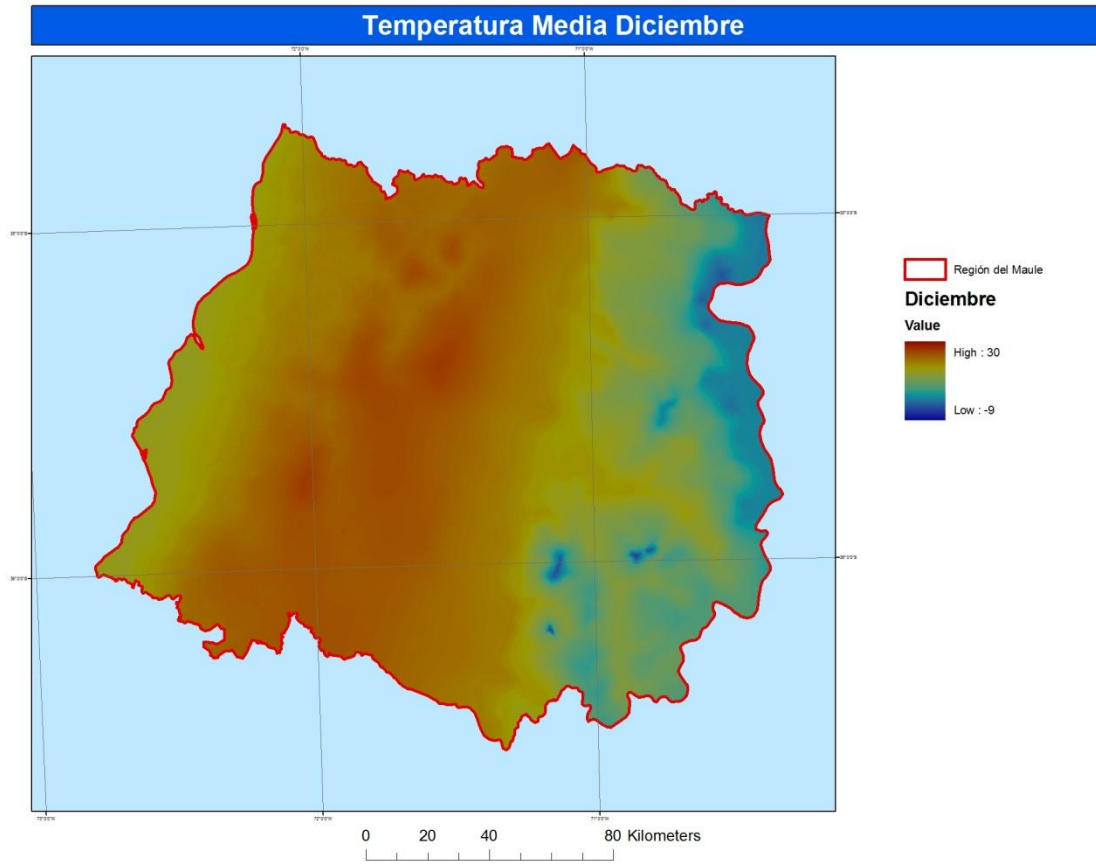


Figura 52. Mapa de temperatura media del mes de diciembre obtenido con el modelo propuesto por Charles-Edwards (Fuente: Elaboración propia).