

## Metodología de la modelación de datos climáticos

Con el propósito de obtener la mejor representación espacial de la climatología de superficie sobre el territorio chileno, se procedió a modelar cada variable climática primaria (temperatura, precipitación, humedad del aire, radiación solar), en función de los factores que más influyen en el comportamiento espacio temporal de estas: latitud, altitud, distancia al mar, factores topográficos locales. La modelación se hizo teniendo como información primaria a la data histórica de estaciones de tierra (período 1980-2017). Complementariamente, en regiones con mayor carencia de información, se incluyó información de períodos de menor extensión temporal proveniente de las estaciones de la Red Agroclimática Nacional (RAN). Dado que los factores topográficos y oceanográficos locales (surgencias frías en las costas) son muy variables en Chile, los modelos numéricos fueron desarrollados y aplicados por tramos de extensión latitudinal variable dependiendo de las complejidades del comportamiento climático de cada región. Una vez creadas las cartas de superficie, ellas fueron validadas verificando el grado de ajuste entre el valor estimado por el modelo y el promedio climatológico en estaciones con series largas y confiables. Las variables primarias fueron proyectadas hacia mediado del siglo XXI mediante la adición de los cambios proyectados por un ensamble de 17 modelos regionales proporcionados por el Centro WorldClim.

### **Generación y Preparación de La Base Climática de Alta Resolución**

Para construir la línea base climática se compiló la información de estaciones meteorológicas de distintas fuentes (Dirección Meteorológica de Chile, Dirección General de Aguas, Red Agroclimática Nacional RAN, y otras fuentes públicas y privadas disponibles), para el período climatológico comprendido entre 1980-2017. Se consideró además, información de períodos anteriores, especialmente en áreas que contaban con menor densidad de estaciones. Dependiendo de la naturaleza de la estación meteorológica se contó con observaciones de: temperatura, precipitación, humedad relativa y/o radiación solar. En total se utilizaron 485 estaciones en toda la región (figura 1). Esta información fue complementada con la información climática espacializada del Atlas Agroclimático de Chile (Santibáñez y Uribe, 1993), la que fue actualizada al período en referencia para este estudio.

En la región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule, existen 197 estaciones con datos de precipitación con más de 30 años de registro y solo 33 estaciones en el caso de las temperaturas. Estas estaciones, que disponen de un largo período de registro, nos permitieron modelar estadísticamente la variabilidad temporal de eventos climáticos extremos como número de heladas mensuales y número de días con temperaturas altas extremas. La figura 2 muestra un ejemplo de los resultados de este análisis.

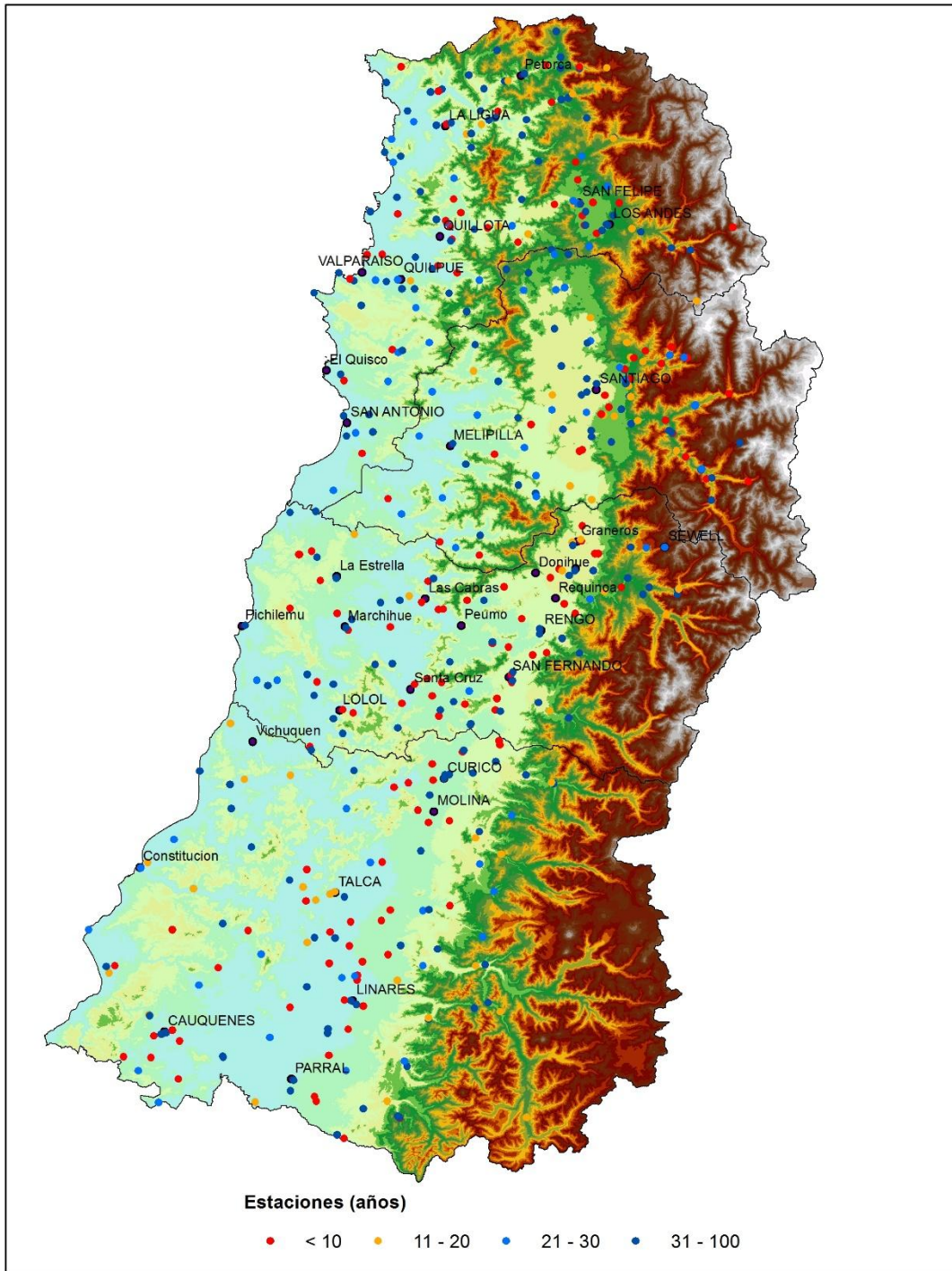


Figura 1. Estaciones meteorológicas de la Red Agroclimática Nacional disponibles para la región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.

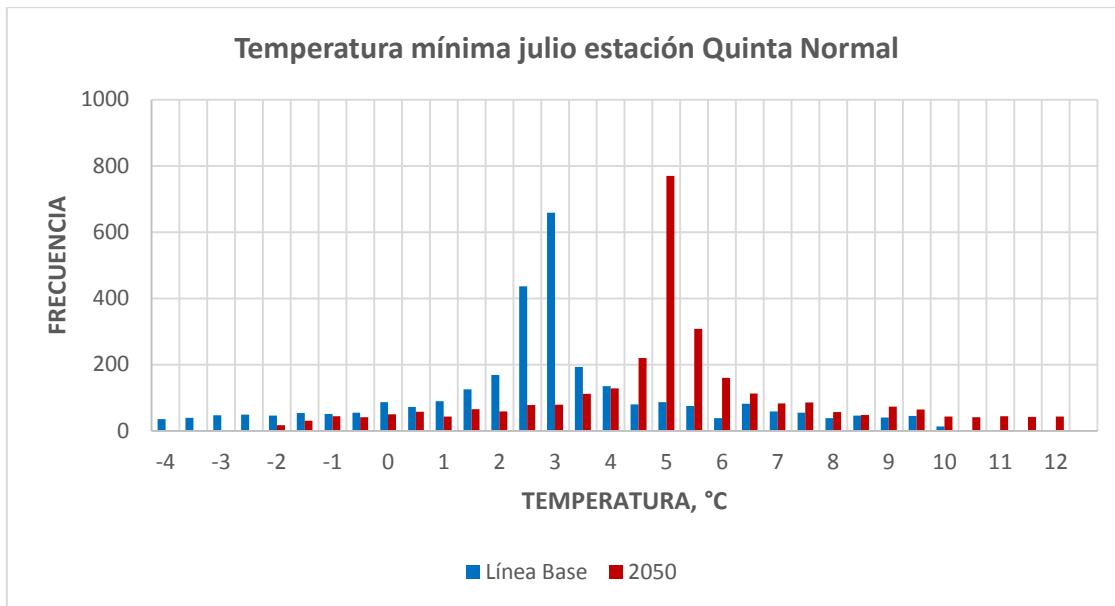
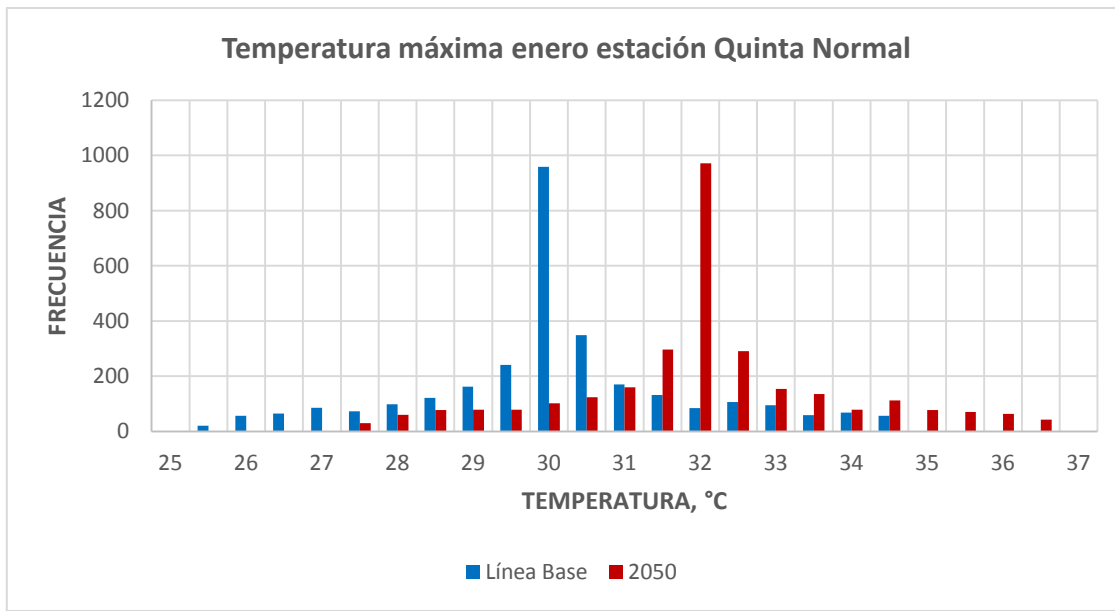


Figura 2. Histograma de frecuencia de días con temperaturas máximas y mínimas en la estación de Santiago para período 1950-2015 y modelación para el escenario 2050.

### Obtención de los Gradientes Verticales de Temperatura a través del uso de Imágenes Satelitales

En la zona de estudio existen más de 300 estaciones meteorológicas, sin embargo en algunas áreas, como zonas montañosas, existe una baja densidad de estaciones, especialmente en el caso de las temperaturas. En estas áreas se requiere densificar los datos climáticos para construir una cartografía de alta resolución espacial. Existen algunos principios termodinámicos que permiten modelar la temperatura en zonas de altura. El gradiente vertical de enfriamiento del aire tiende a valores cercanos a 0.6°C por cada 100 metros. Este valor puede considerarse el gradiente térmico

normal en las capas más bajas de la tropósfera. Sin embargo este valor puede variar localmente dependiendo los “driver climáticos” presentes en cada zona, tales como surgencias marinas, cuerpos de agua, relieve, latitud y otras singularidades geográficas. Una anomalía que modifica el valor del gradiente térmico vertical se produce durante los períodos de inversiones térmicas, cuando la temperatura del aire en vez de descender, aumenta con la altitud. Esta situación es muy frecuente después de varios días de tiempo estable, en donde el aire tiende a estratificarse según su densidad, quedando el aire más frío en las primeras capas, cercano a la superficie, mientras que el aire más tibio permanece en estratos más elevados. Este fenómeno es típico durante las mañanas en invierno en la zona Central de Chile en valles poco ventilados.

Las imágenes térmicas nos permiten conocer las temperaturas superficies en todo el territorio ya que representan las variaciones espaciales dentro de este. A través de estas imágenes es posible obtener detalles que los algoritmos de interpolación espacial no son capaces de representar, como islas térmicas de concentración de masas de aire frío, efecto Foehn o sombras de lluvia (contraste climático entre laderas oriente y poniente), dinámica de las corrientes catabáticas nocturnas que acumulan aire frío en las partes bajas del relieve, efecto atemperador de los cuerpos de agua sobre los bordes, capa límite del océano sobre el litoral y otras singularidades (Figura 3).

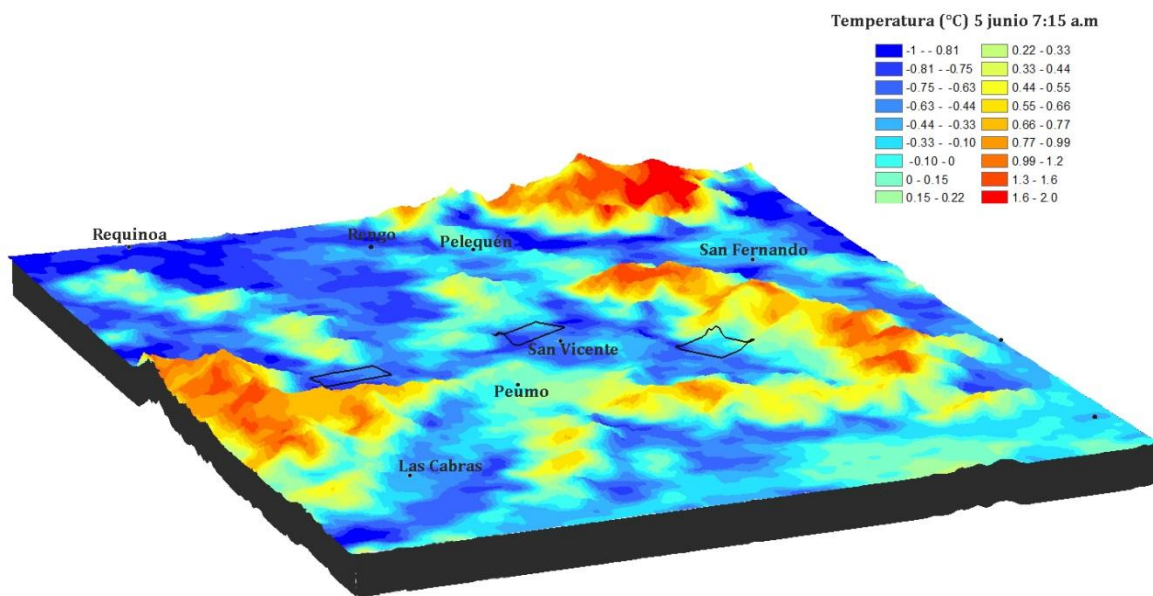


Figura 3. Variaciones de la temperatura a micro escala durante una noche de helada en el valle interior de la zona Central de Chile. Técnica utilizada para refinar la cartografía agroclimática. Cada color representa una temperatura diferente. Los colores azules indican las temperaturas más bajas y los amarillos a rojos las temperaturas más elevadas. Se puede apreciar así la configuración general de los apozamientos de aire frío y los sectores que escapan a la invasión de aire frío.

## Densificación de información proveniente de estaciones meteorológicas

Para hacer la modelación de las variables climáticas se densificaron las estaciones meteorológicas disponibles a través de la generación de estaciones virtuales. La información de temperatura de estas estaciones virtuales se generó a partir de los datos provenientes las imágenes térmicas satelitales (NOAA- AVHRR) y un modelo digital de elevación. Combinando estos dos elementos podemos determinar cada zona los diferentes gradientes verticales de temperaturas máximas y mínimas. Esto permite suplir en parte las lagunas de información en ciertas zonas del territorio, particularmente en áreas de altura.

Luego de un tratamiento de las series históricas disponibles de las estaciones meteorológicas, con el objetivo de validar la información y obtener promedios y estadísticas de dispersión, se aplicaron métodos cartográficos que permitieron hacer interpolaciones confiables para obtener los patrones de variación espacial de cada variable. Obtención de la cartografía climática de alta resolución

Se modeló el régimen térmico y de precipitación con resolución de 1 km para el período 1980 y 2015, a través de regresiones múltiples no lineales que consideran como variables explicativas la elevación, la latitud y la distancia al mar de cada estación. Una vez obtenido el modelo para cada variable, este se calibró con estaciones reales de tierra de modo de dimensionar su grado de bondad.

Ejemplo de regresión utilizada para la temperatura máxima:

$$T_x = \alpha + \beta * \text{elevación} + \gamma * \text{latitud} + \delta * \text{distancia mar} + \varepsilon * \text{elevación}^2 + \theta * \text{latitud}^2 + \vartheta * \text{distancia mar}^2$$

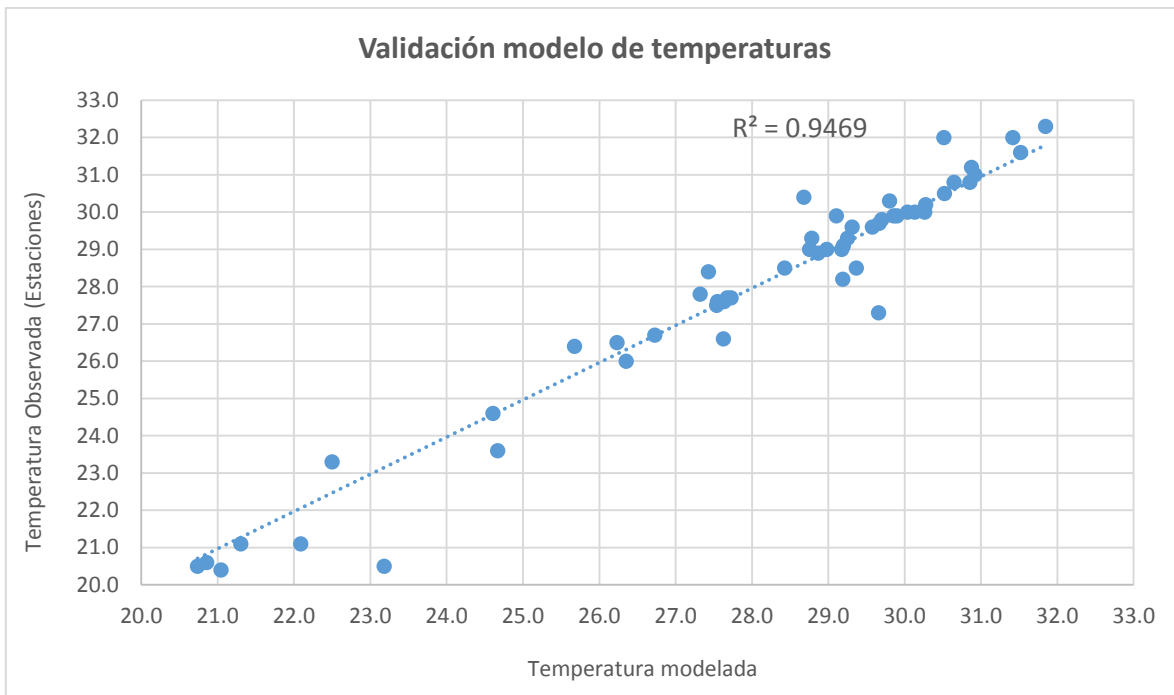


Figura 4. Validación modelo de temperaturas máxima de enero para la región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Temperatura modelada v/s temperatura observada proveniente de las estaciones meteorológicas.

Como resultado de aplicar este modelo a toda la región de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule, se obtienen mapas climáticos de alta resolución espacial, donde se distinguen variaciones espaciales con resolución de 1 x 1 kilómetro. Las figuras 5, 6 y 7 muestran el nivel de detalle entregado por los modelos numéricos utilizados.

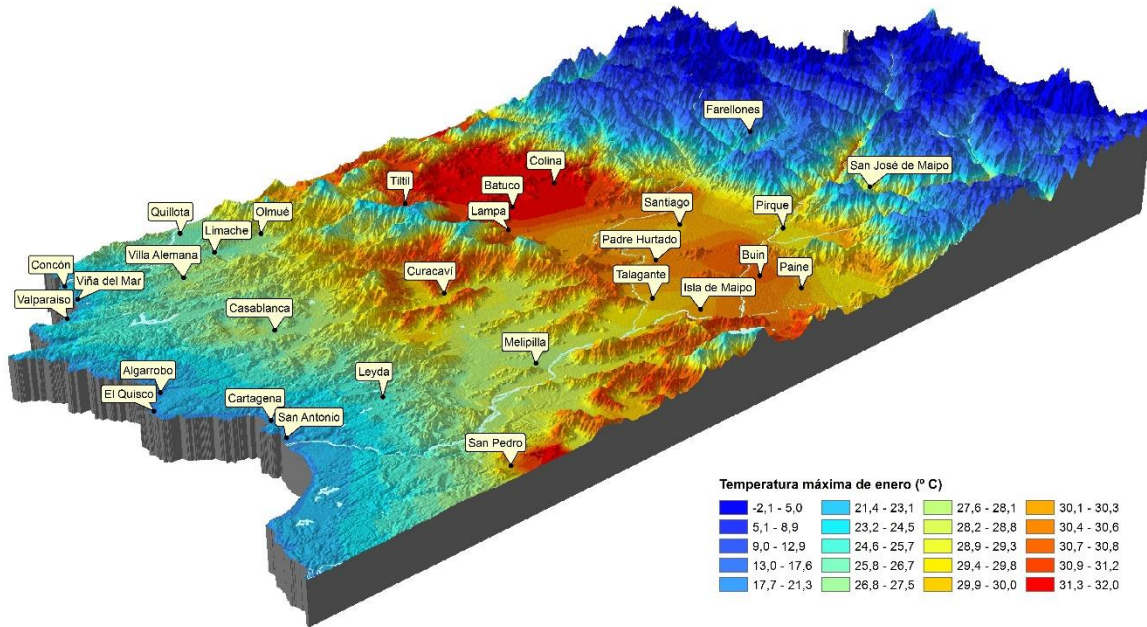


Figura 5. Muestra del resultado de la modelación de la temperatura máxima en un sector que comprende las localidades de Concón, San Antonio, Colina, San José de Maipo y sus alrededores.

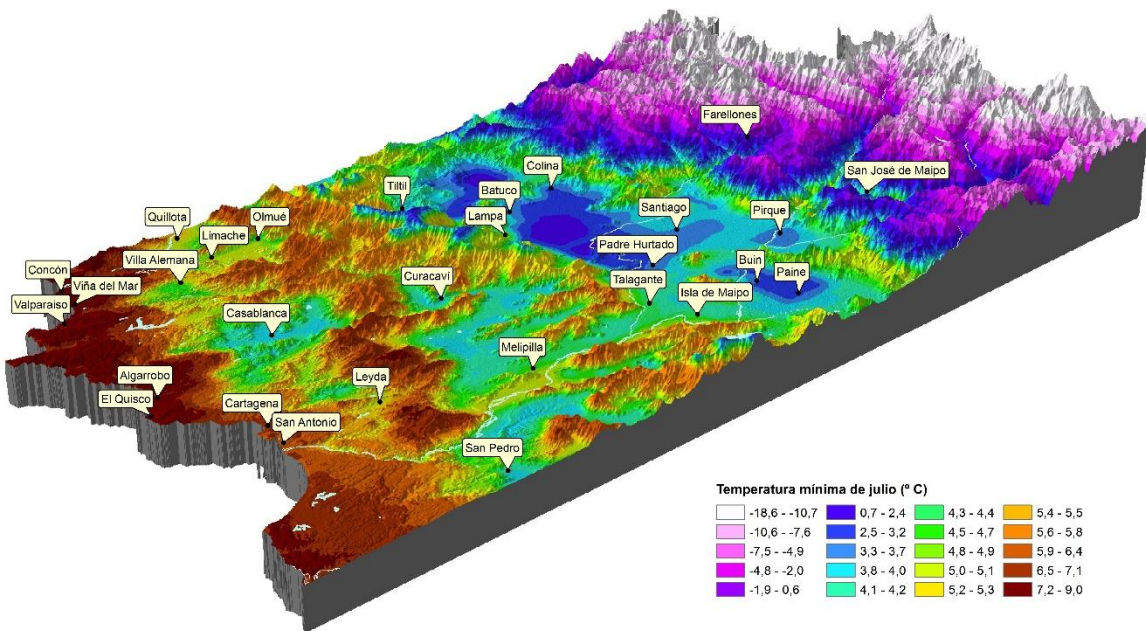


Figura 6. Muestra del resultado de la modelación de la temperatura mínima de julio en un sector que comprende las localidades de Concón, San Antonio, Colina, San José de Maipo y sus alrededores.

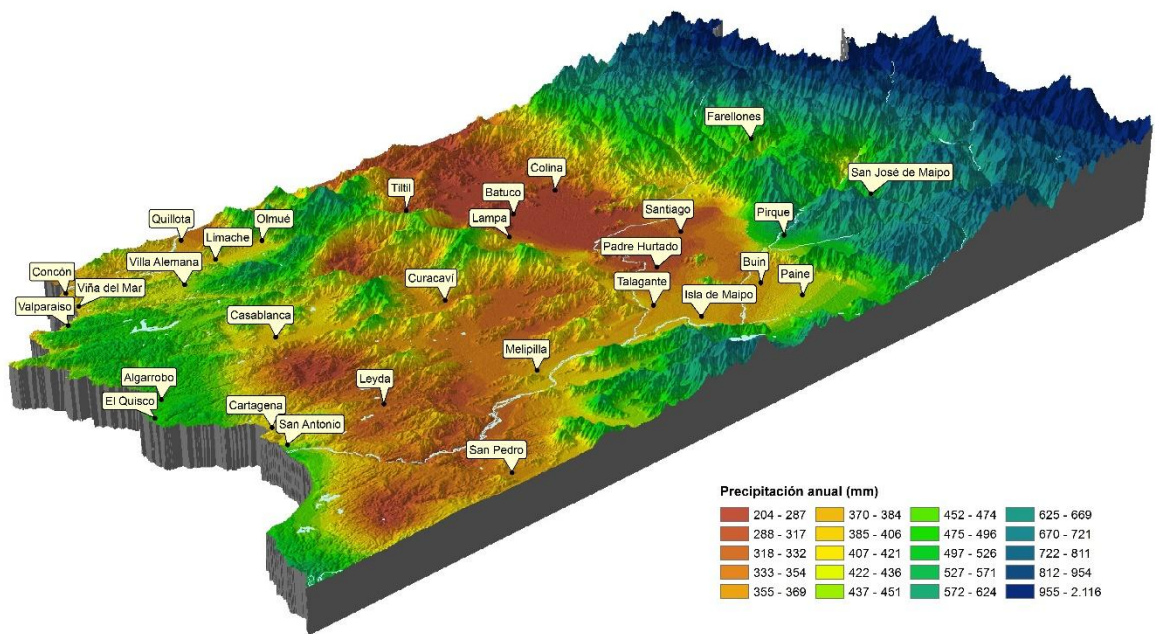


Figura 7. Muestra del resultado de la modelación de la precipitación anual en un sector que comprende las localidades de Concón, San Antonio, Colina, San José de Maipo y sus alrededores.