



# Escenarios climáticos e indicadores para la medición del riesgo

**Indicadores de riesgos bioclimáticos para una gestión eficiente  
del agua del cultivo de avellano europeo en Chile**

Paula Santibáñez  
Ing. Civil, Dra. Cs Silvoagropecuarias

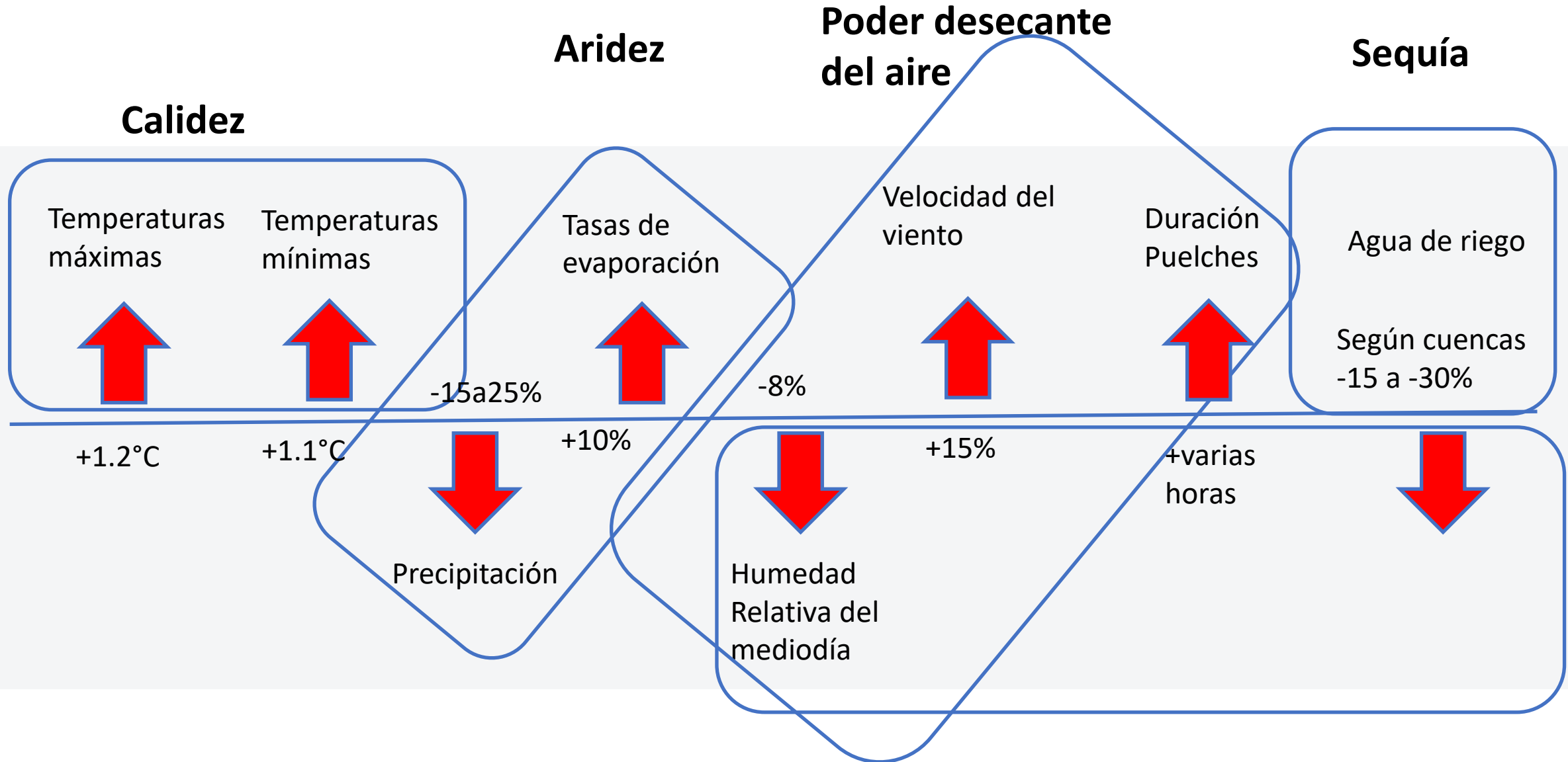
El proyecto que busca abordar una pregunta muy concreta: cómo traducir la variabilidad y los extremos climáticos en información útil para medir riesgo en el cultivo de avellano europeo.

Necesitamos entender en qué momento esas condiciones comienzan a afectar el funcionamiento fisiológico del cultivo y, por lo tanto, su productividad y sus necesidades de manejo.

En ese contexto, este proyecto se centra en el desarrollo de indicadores de riesgo bioclimático para el avellano europeo en Chile, con un foco especial en la gestión eficiente del agua y en la adaptación frente a eventos atmosféricos extremos. La propuesta considera evaluación fisiológica en huertos comerciales, modelación de alta resolución temporal y espacial, y transferencia de resultados a través de una plataforma digital.

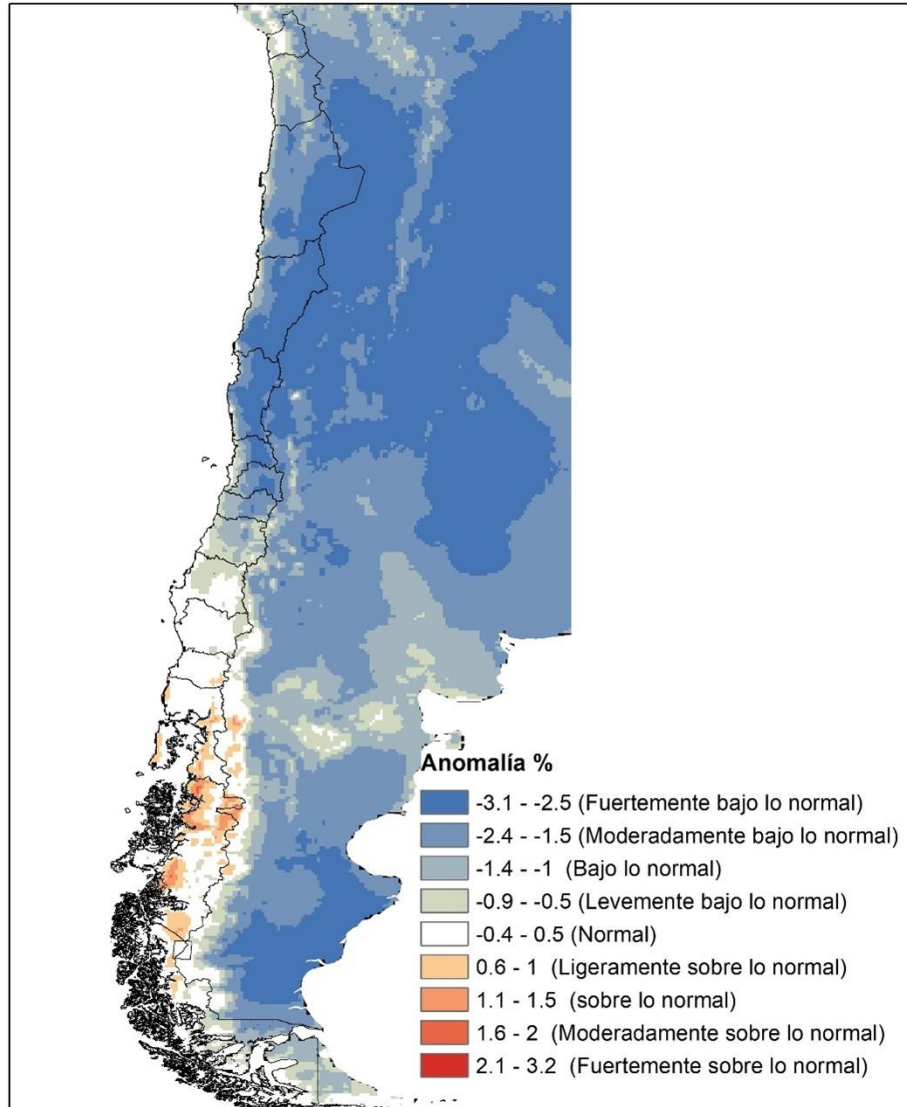
El objetivo general del proyecto es mejorar la gestión de los huertos de avellano mediante la evaluación y monitoreo de indicadores bioclimáticos que apoyen un uso eficiente de los recursos hídricos y un mejor manejo de los riesgos asociados a eventos extremos

# Tendencias ya observadas en el clima de la zona central

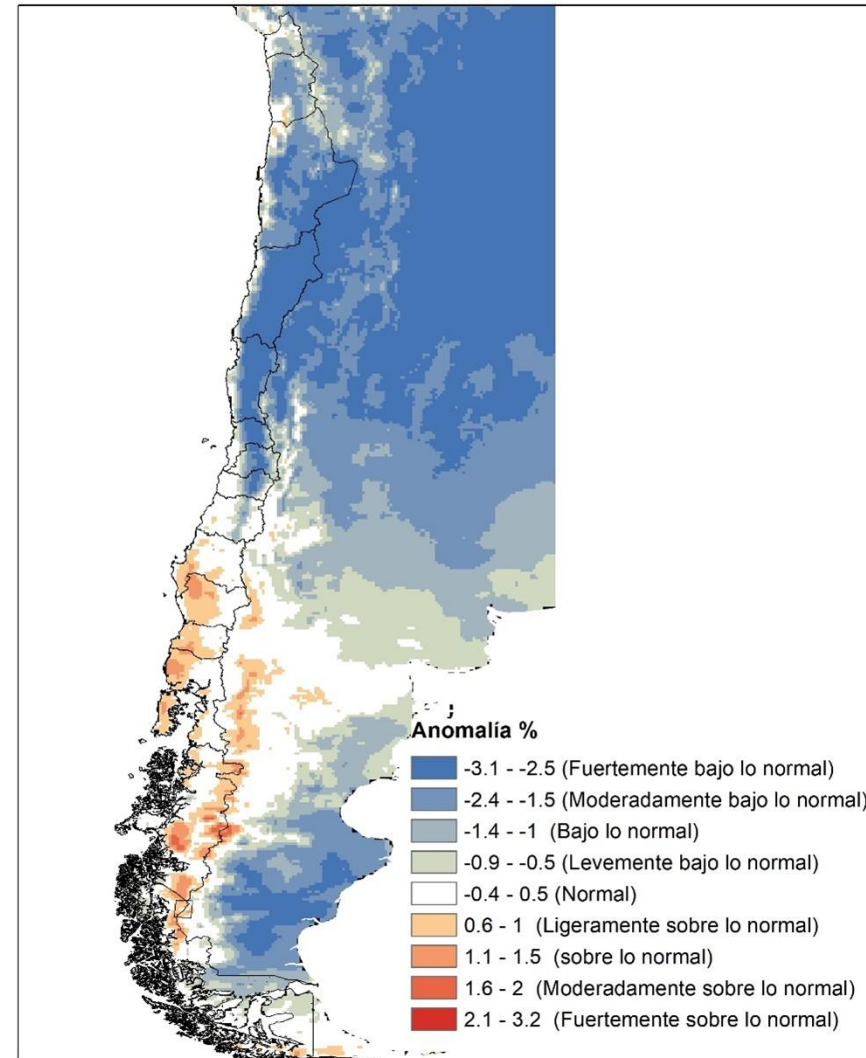


**Clima más estresante**

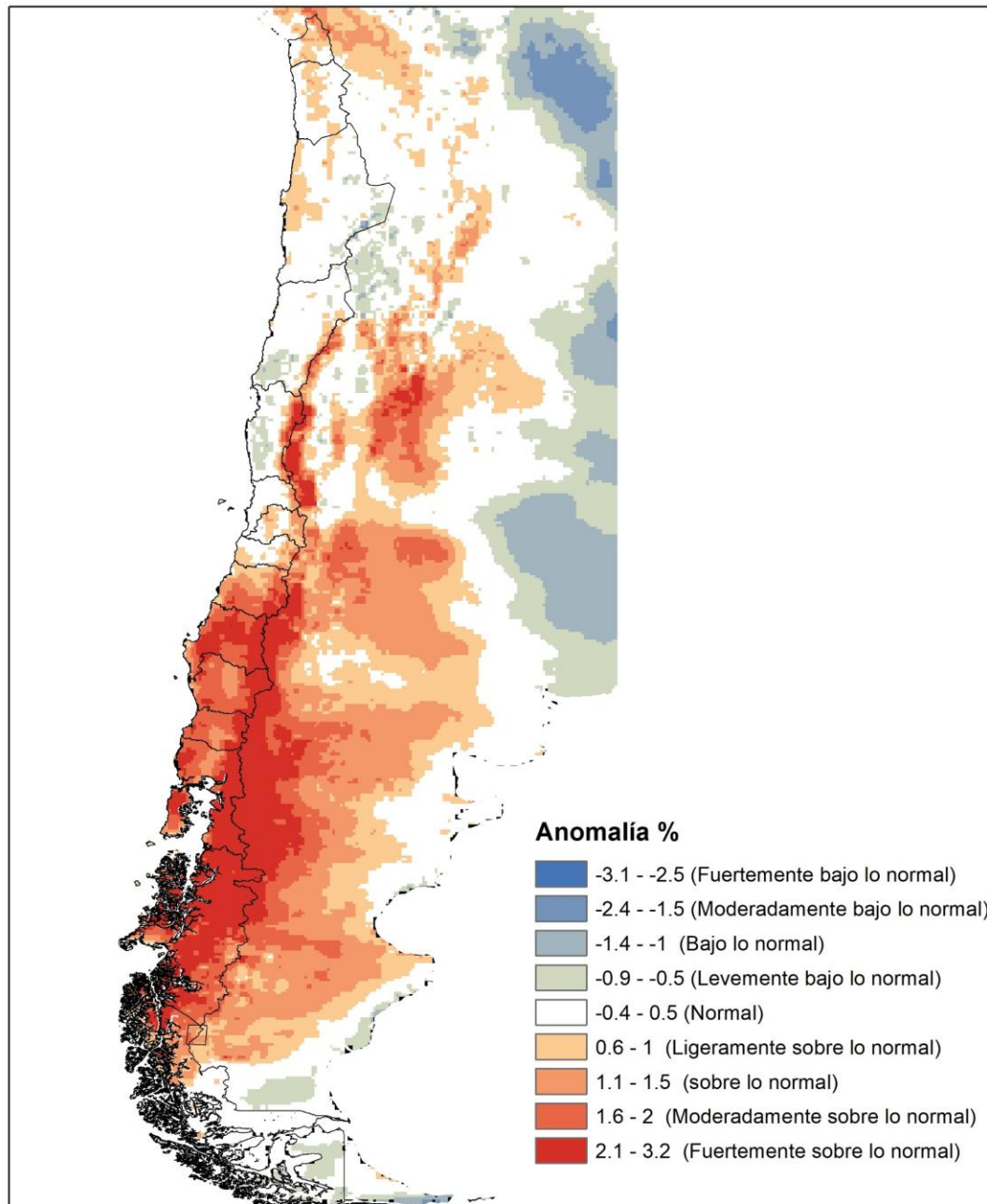
## ANOMALÍA TEMPERATURA MÁXIMA SEPTIEMBRE 2025



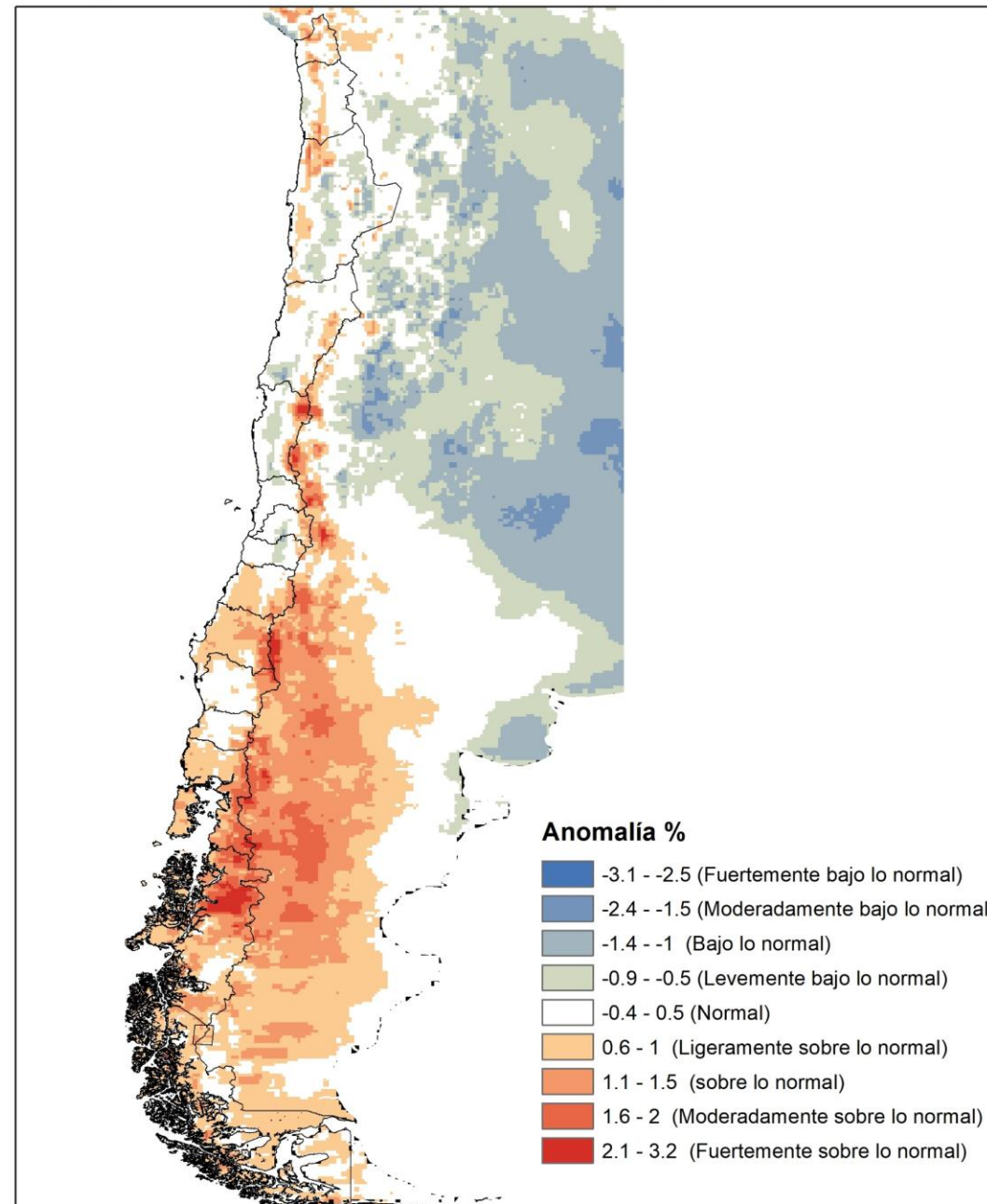
## ANOMALÍA TEMPERATURA MÍNIMAS SEPTIEMBRE 2025



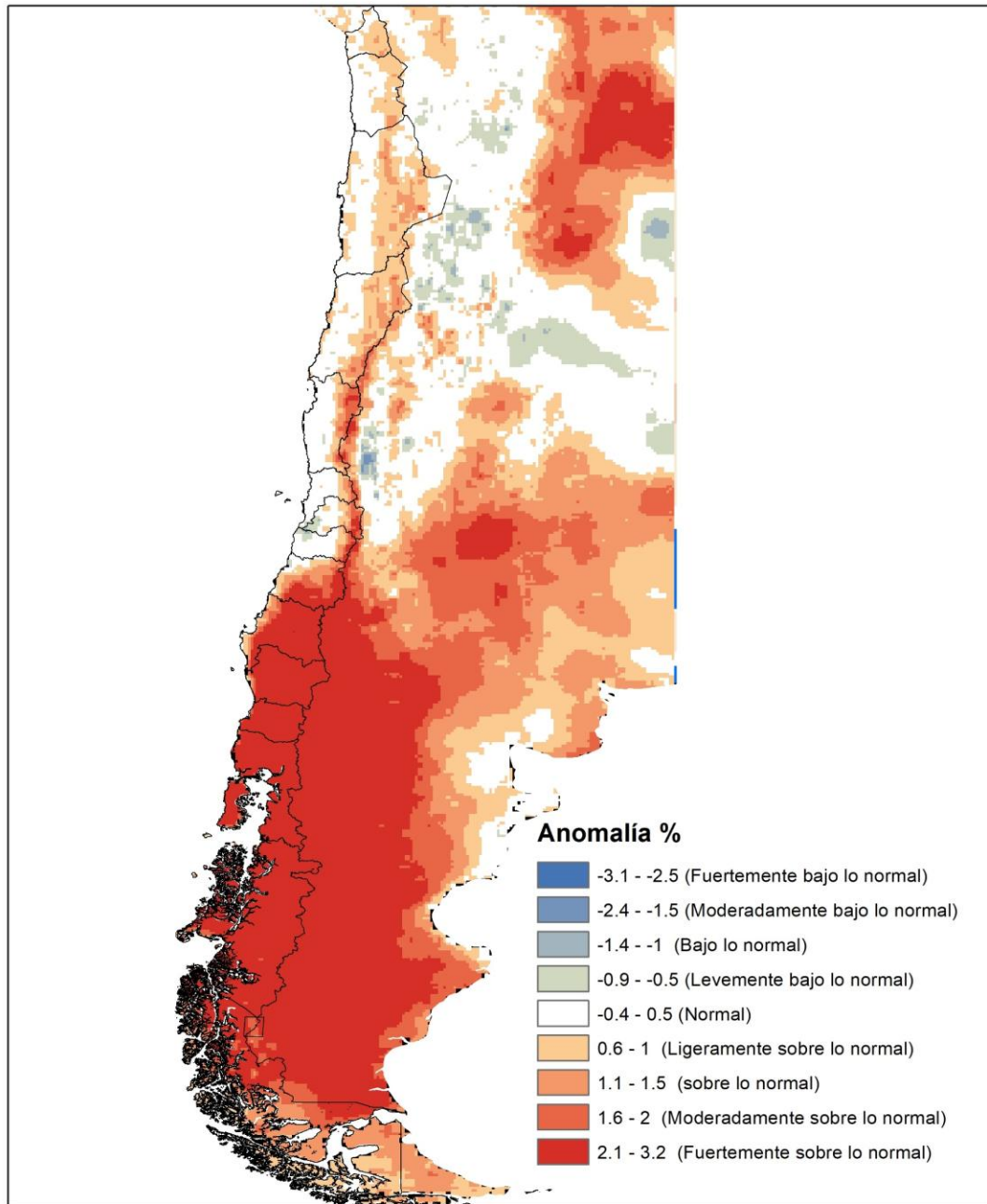
# ANOMALÍA TEMPERATURA MÁXIMA NOVIEMBRE 2025



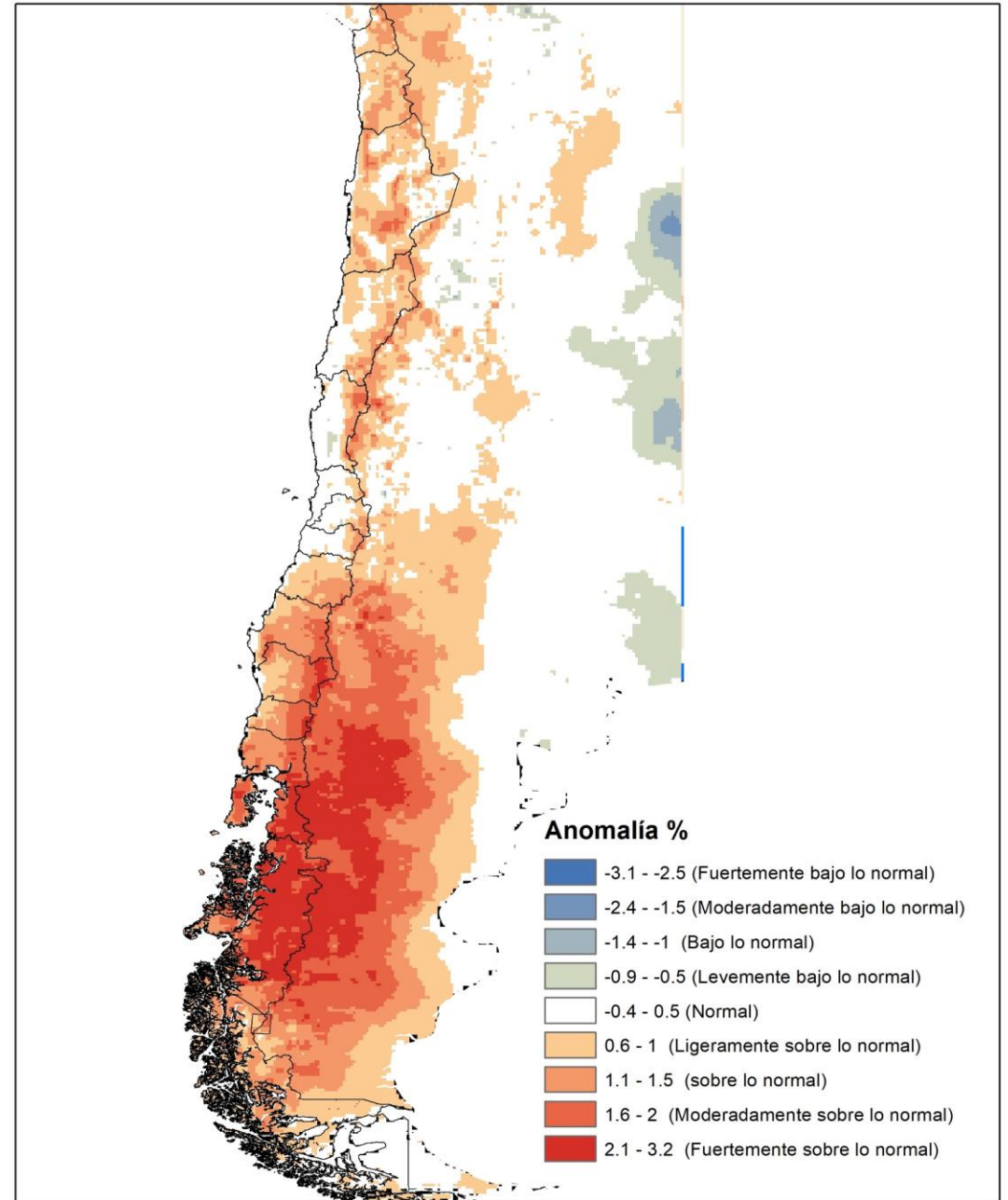
# ANOMALÍA TEMPERATURA MÍNIMA NOVIEMBRE 2025

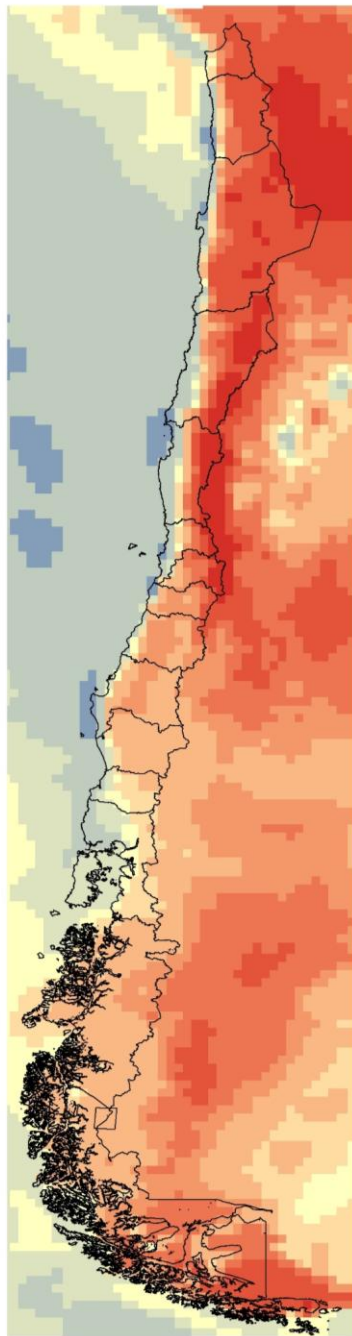


# ANOMALÍA TEMPERATURA MÁXIMA ENERO 2026

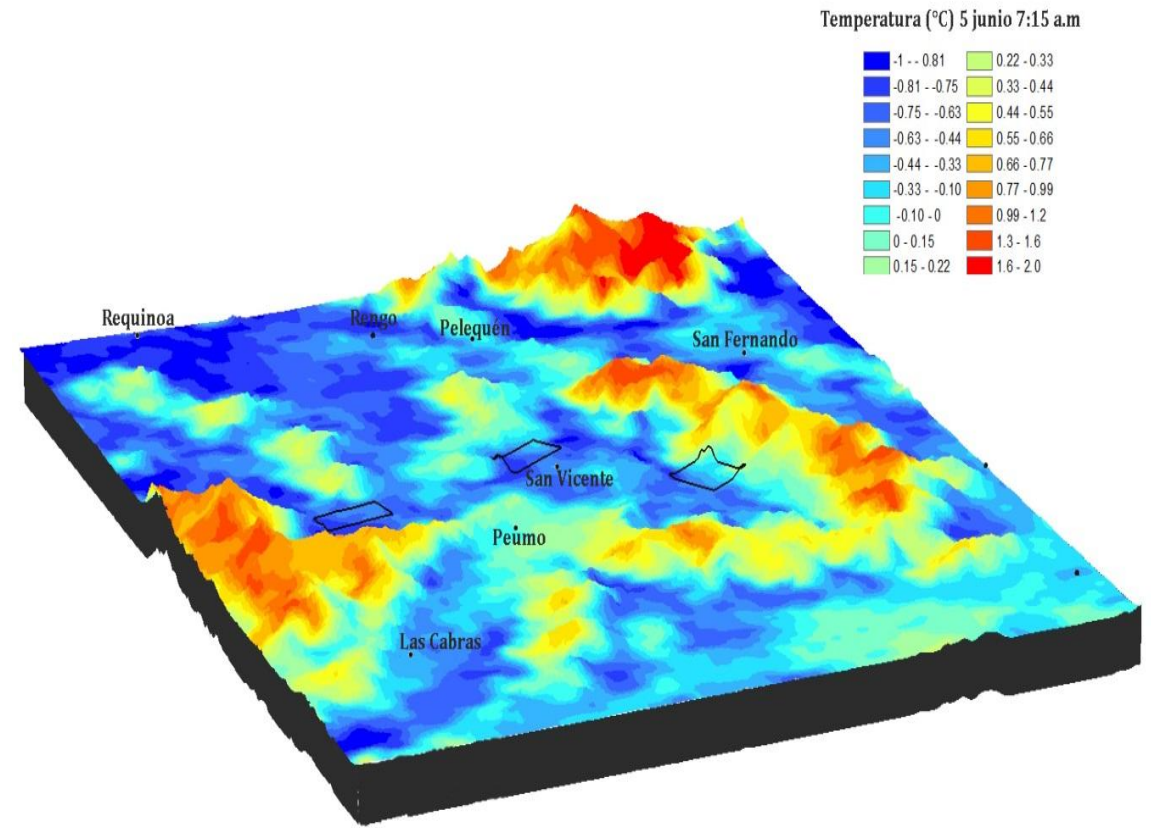
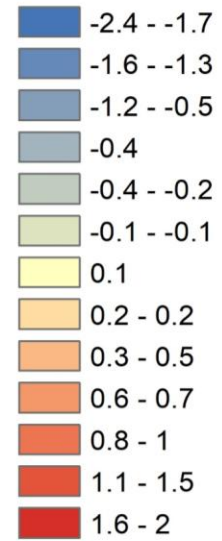


# ANOMALÍA TEMPERATURA MÍNIMA ENERO 2026





°C



# Metodología del proyecto

## 1. Diagnóstico climático

Caracterización del clima de la zona central de Chile e identificación de señales de riesgo más frecuentes: altas temperaturas, baja humedad relativa, alto déficit de presión de vapor, viento seco y estrés acumulado.



## 2. Validación en huertos comerciales

Evaluación en dos huertos de avellano europeo en la Región del Maule: Pelarco y Molina, bajo condiciones bioclimáticas contrastantes, con las variedades Tonda di Giffoni y Barcelona.



## 3. Medición fisiológica y productiva

Medición de asimilación de CO<sub>2</sub>, transpiración, conductancia estomática, potencial hídrico xilemático, temperatura foliar, rendimiento y calidad de fruto.



## 4. Modelación horaria del riesgo

Construcción de índices de estrés bioclimático y modelos horarios para representar la demanda transpiratoria atmosférica, el estado hídrico del cultivo y las necesidades de riego mediante balance hídrico del suelo.



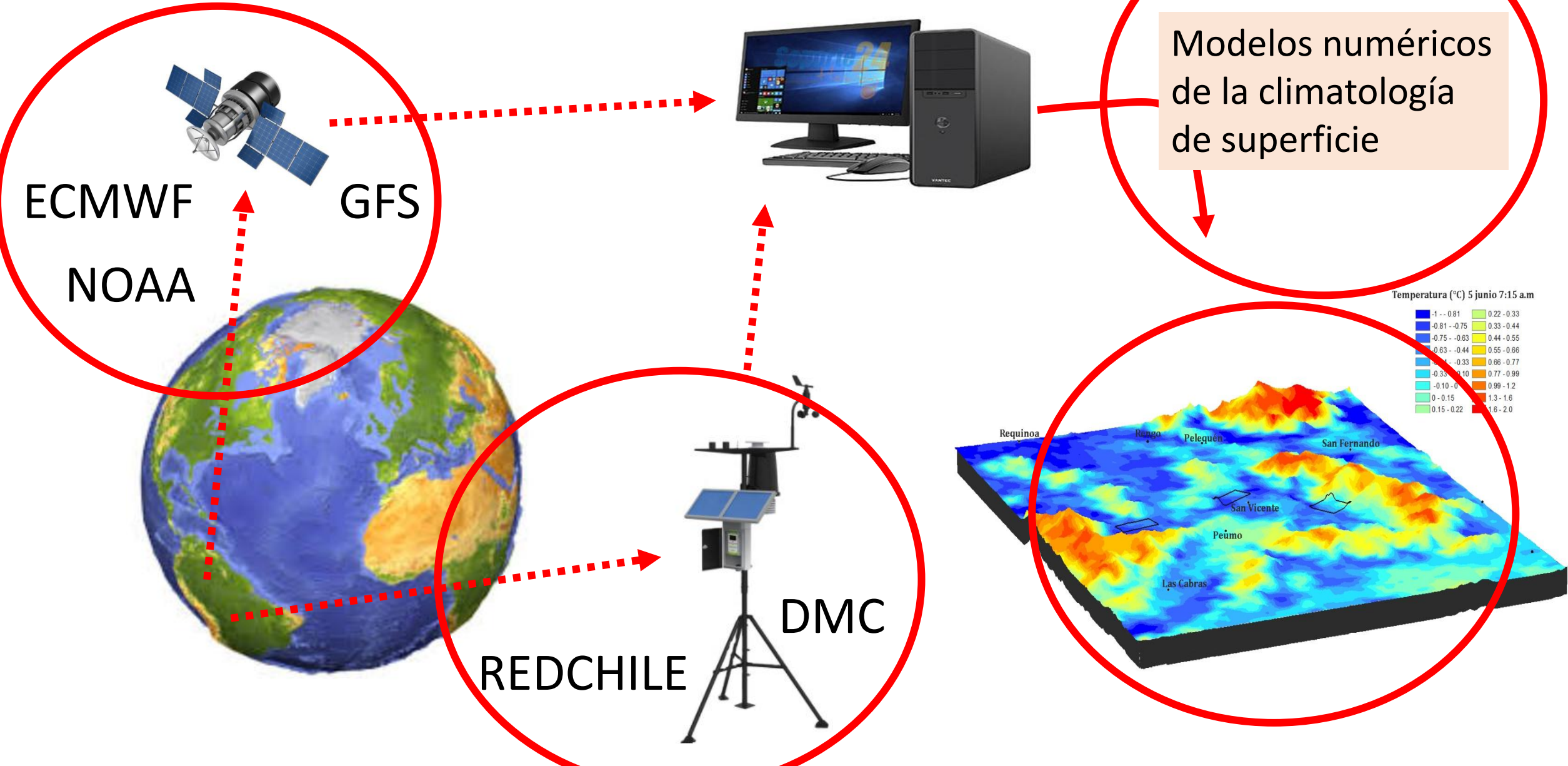
## 5. Plataforma OCUSS

Integración de los resultados en el Observatorio Climático USS mediante mapas interactivos, espacialización a 1×1 km y pronóstico de evapotranspiración y requerimientos de riego a 6 días.

*Del clima al huerto, del huerto al modelo, y del modelo a una plataforma para apoyar decisiones de manejo.*

# Arquitectura Observatorio

Un sistema integrado para la detección del riesgo en alta definición



ECMWF  
NOAA

GFS

Modelos numéricos de la climatología de superficie

REDCHILE

DMC

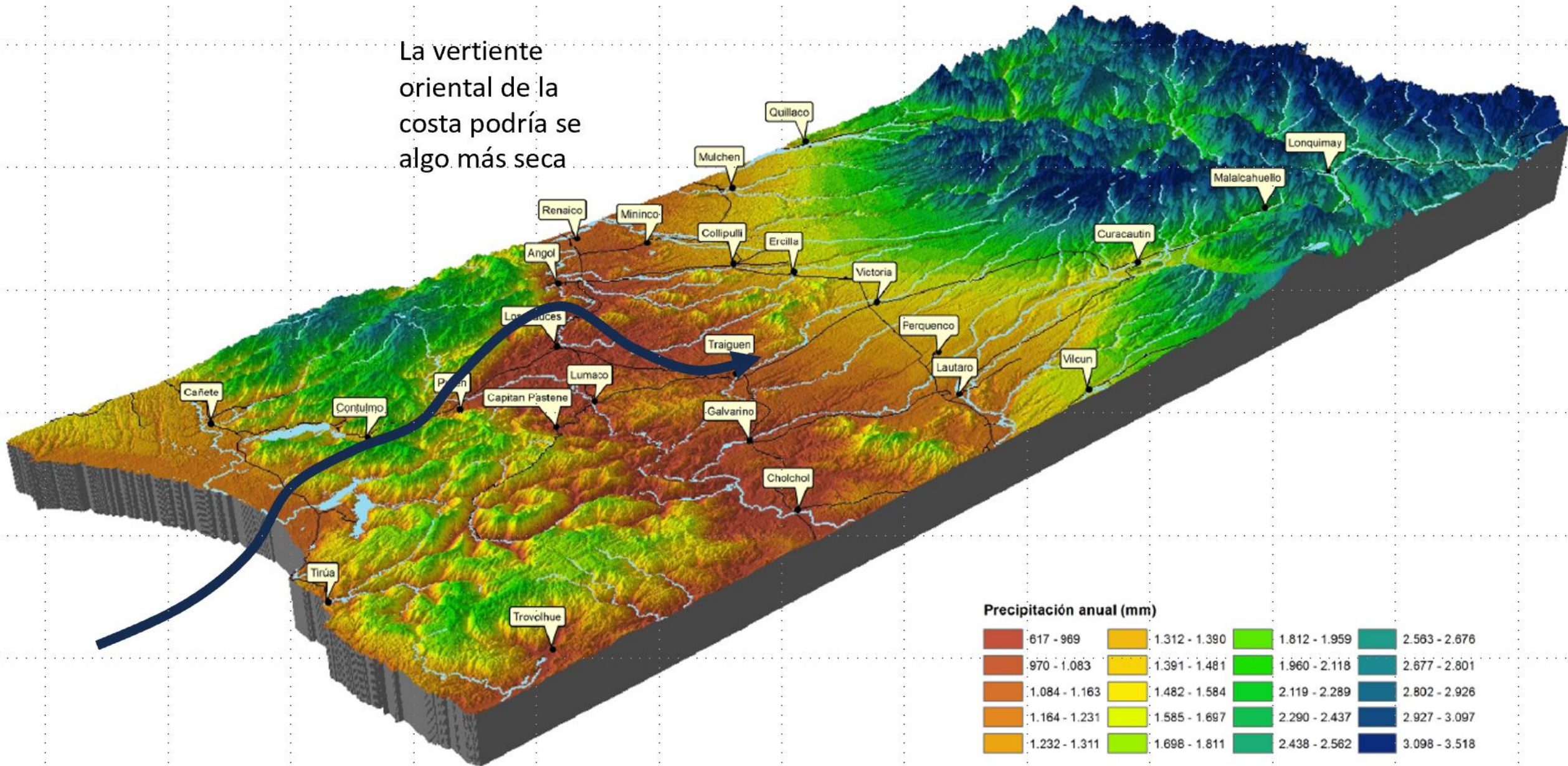
Temperatura (°C) 5 junio 7:15 a.m.

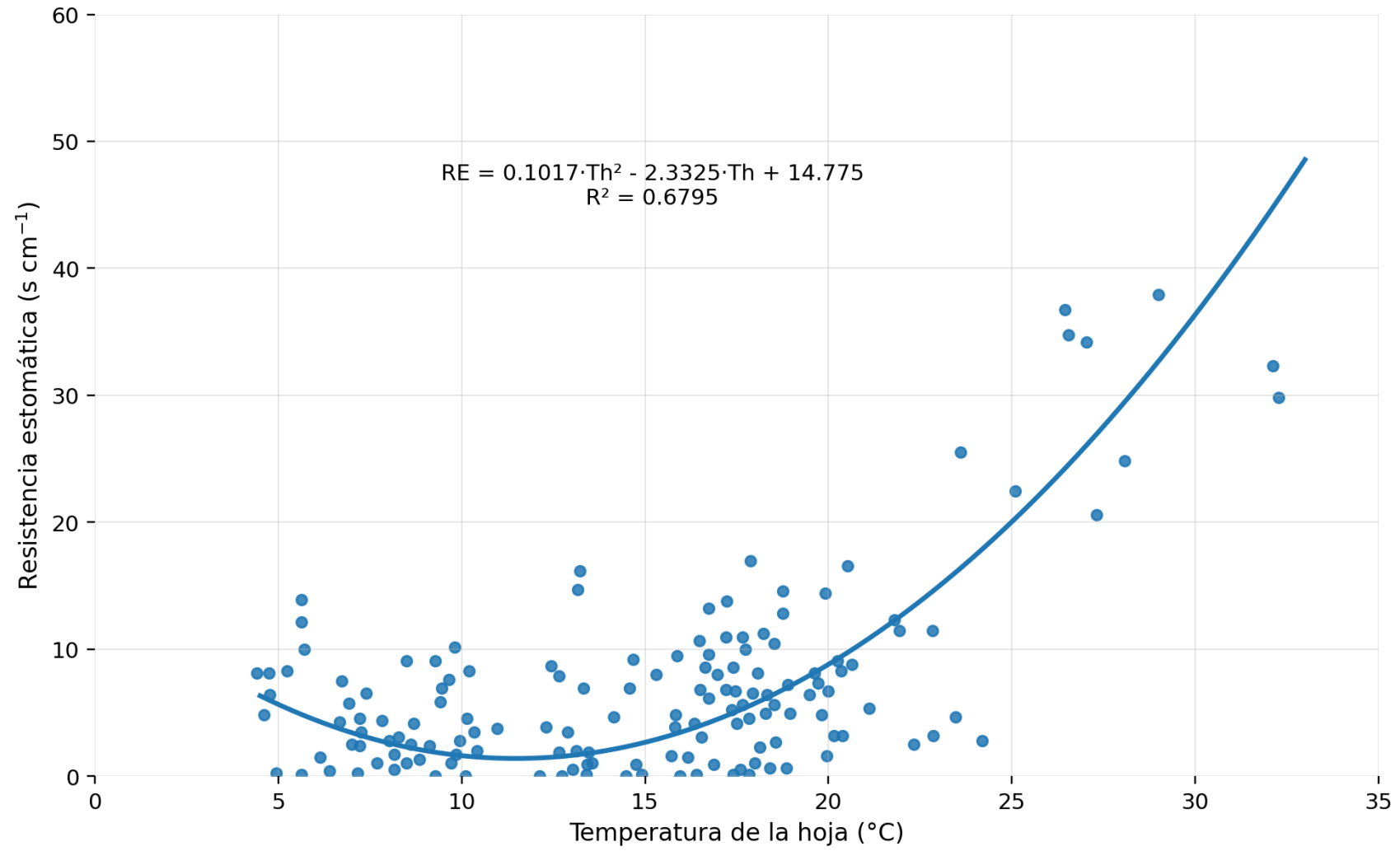
-1 - -0.81	0.22 - 0.33
-0.81 - -0.75	0.33 - 0.44
-0.75 - -0.63	0.44 - 0.55
-0.63 - -0.44	0.55 - 0.66
-0.44 - -0.33	0.66 - 0.77
-0.33 - -0.10	0.77 - 0.99
-0.10 - 0	0.99 - 1.2
0 - 0.15	1.3 - 1.6
0.15 - 0.22	1.6 - 2.0

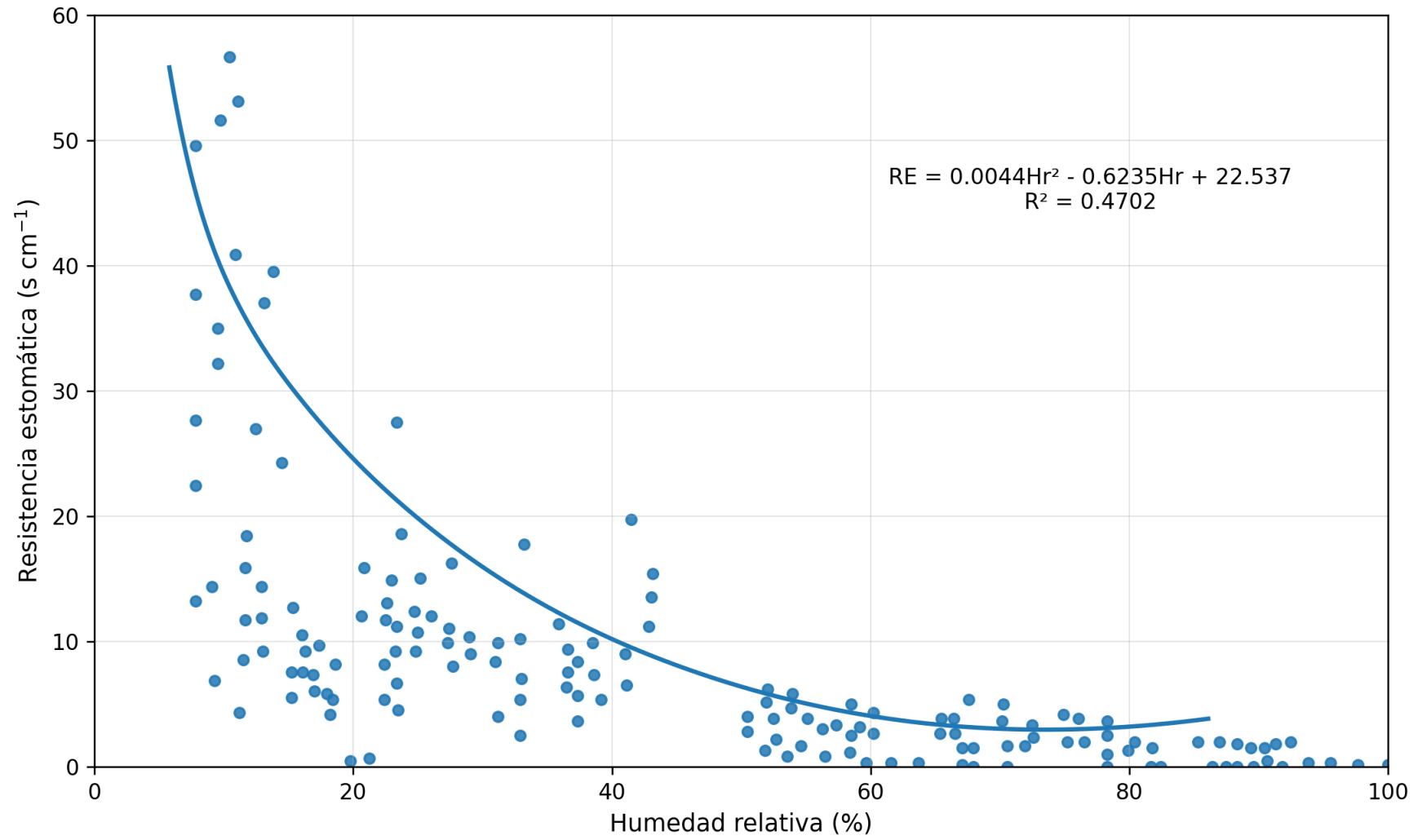
Requinoa Rengo Pelequen San Fernando

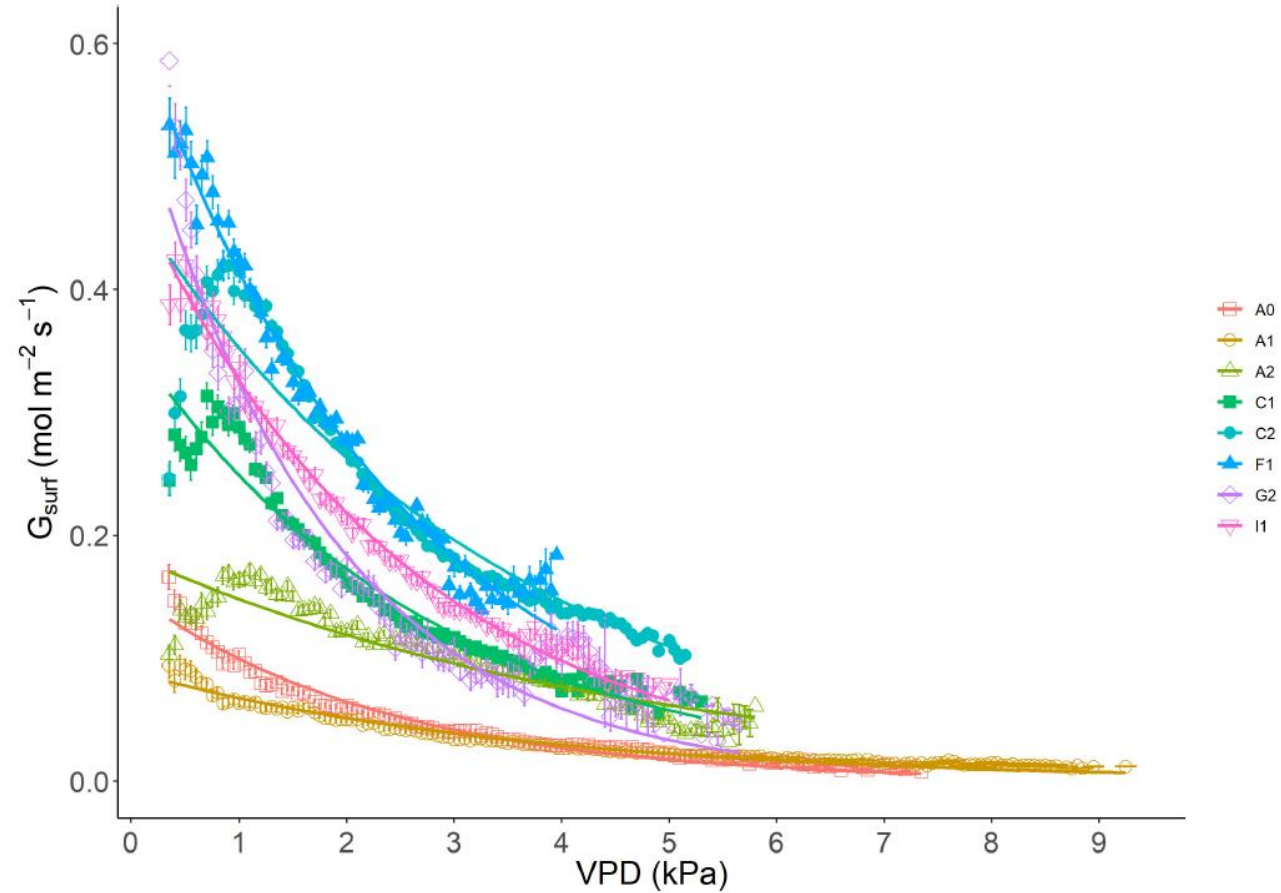
San Vicente Peumo Las Cabras

La vertiente  
oriental de la  
costa podría se  
algo más seca



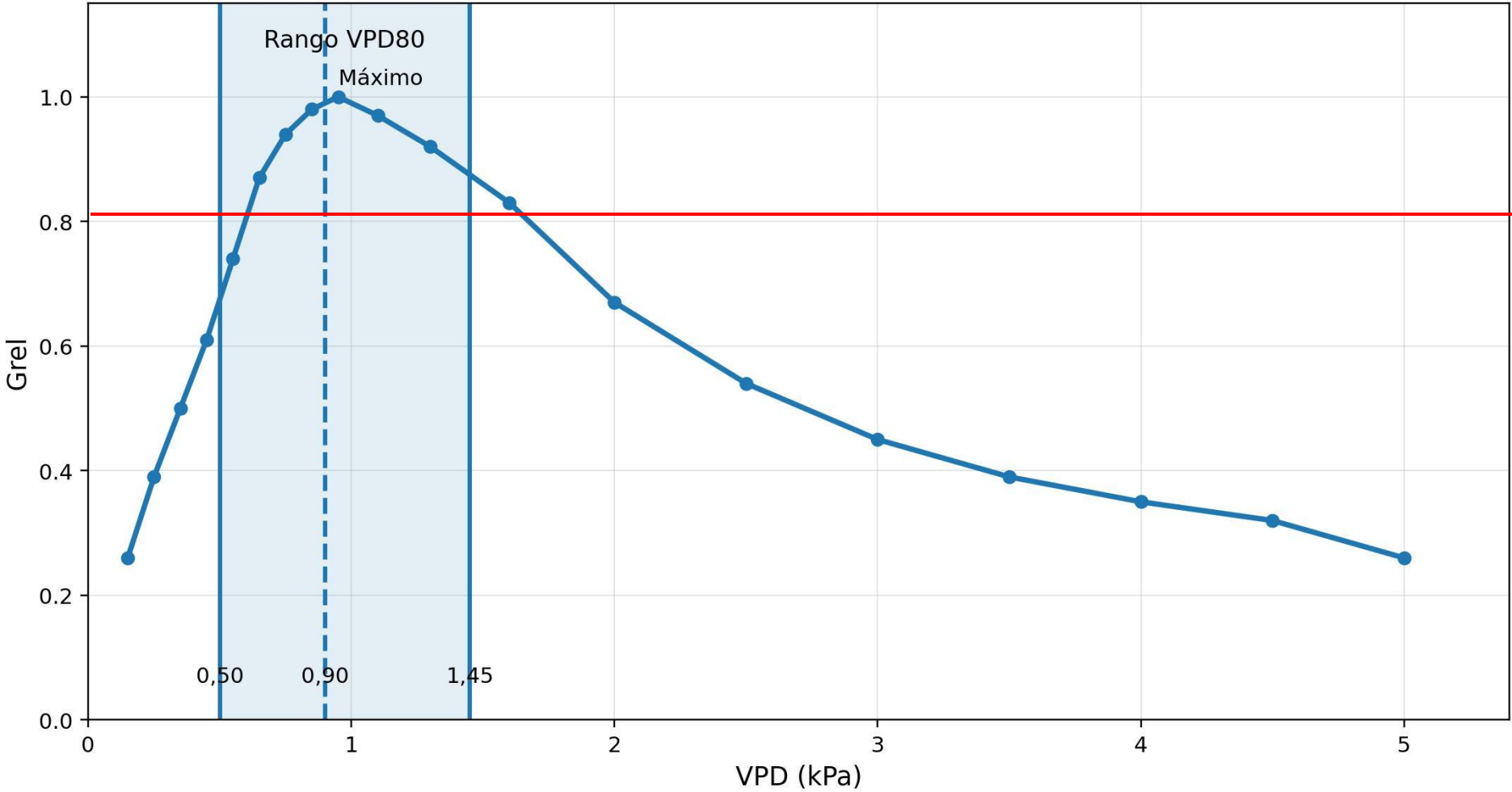




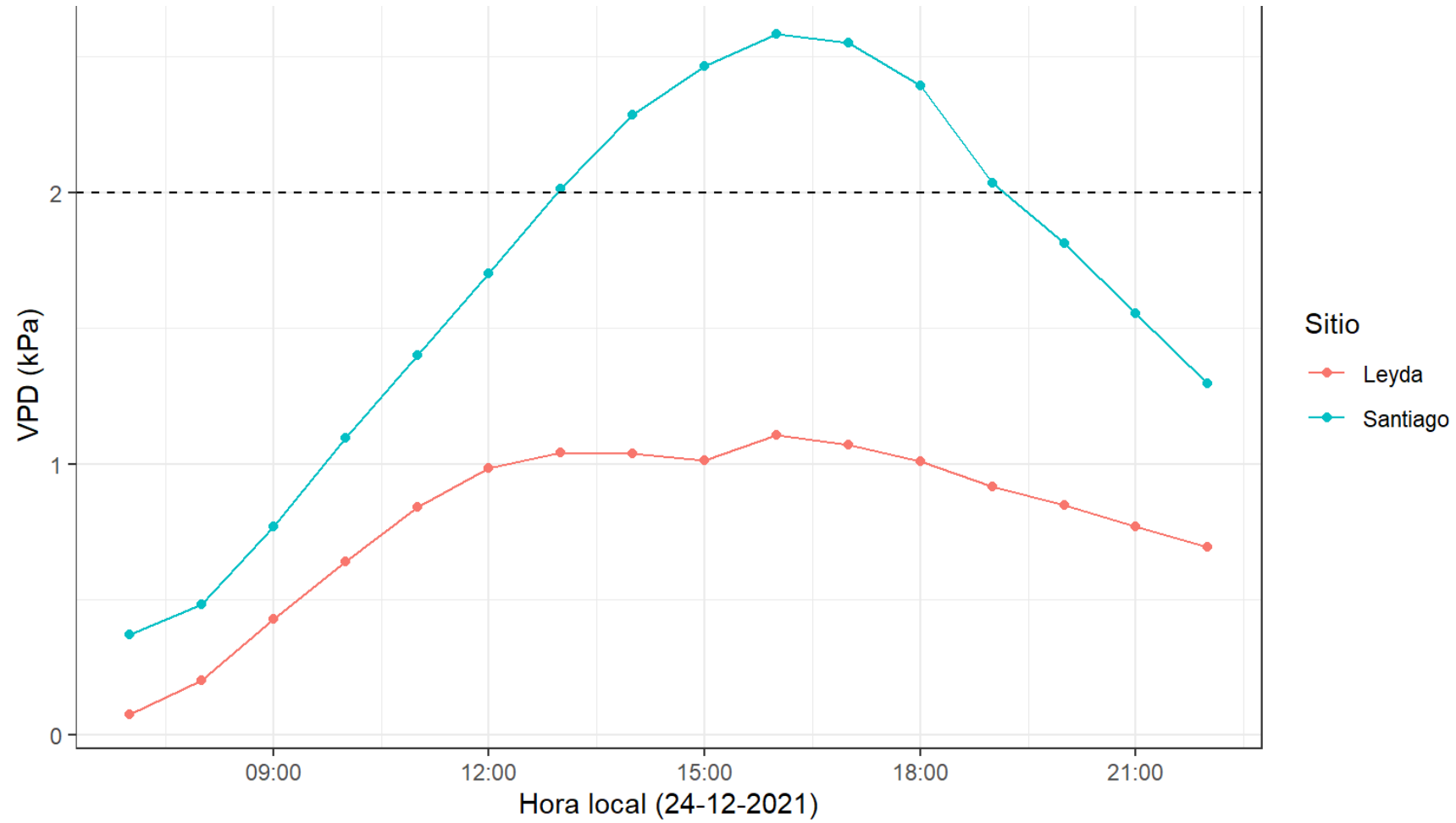


**FIGURE 2** | Response of  $G_{surf}$  to VPD in different sites (absolute values). Data are binned using 0.1 kPa bin size. SE per each interval of 0.1 kPa of VPD is shown on site-related markers.

Sitio C2: respuesta relativa de la conductancia al VPD

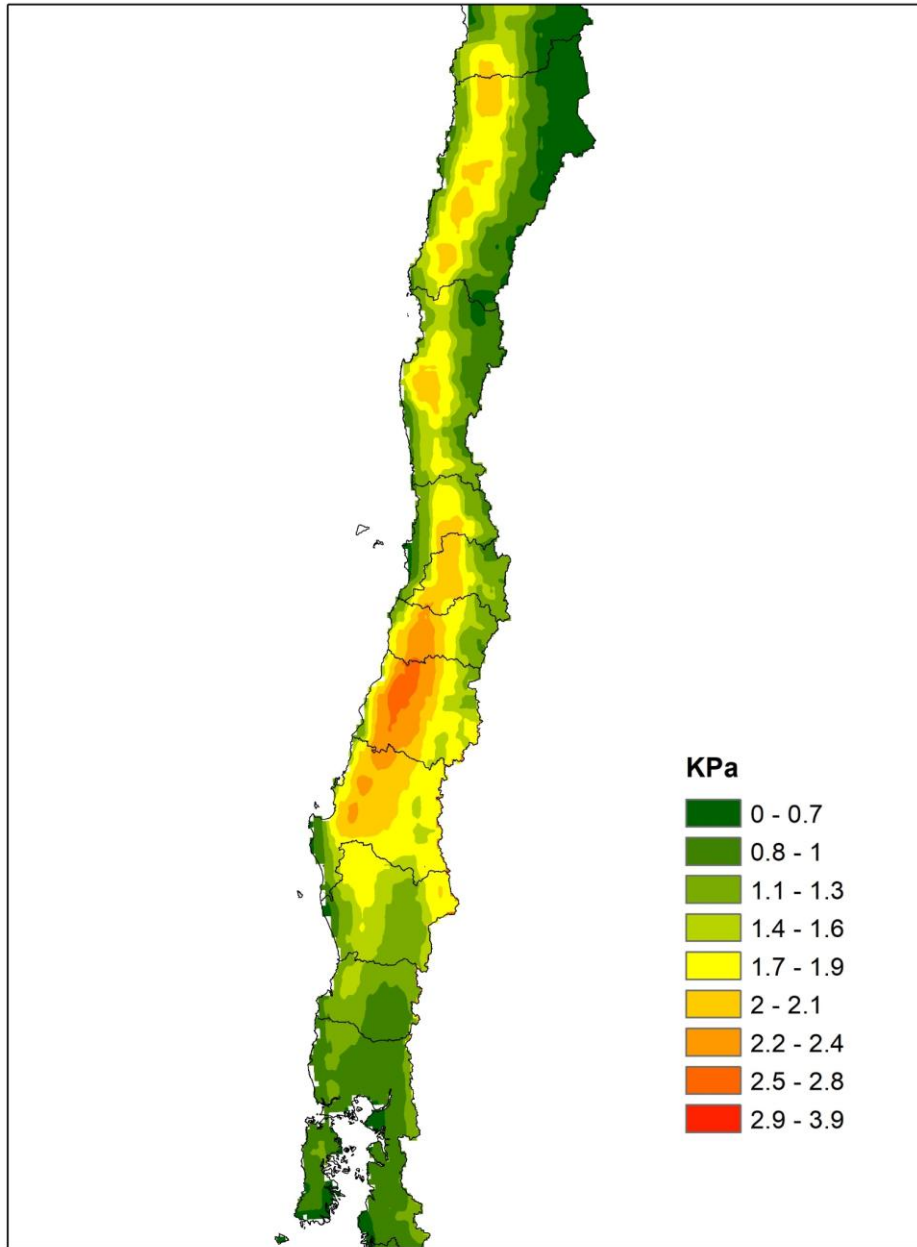


VPD horario (extendido hasta las 22:00)



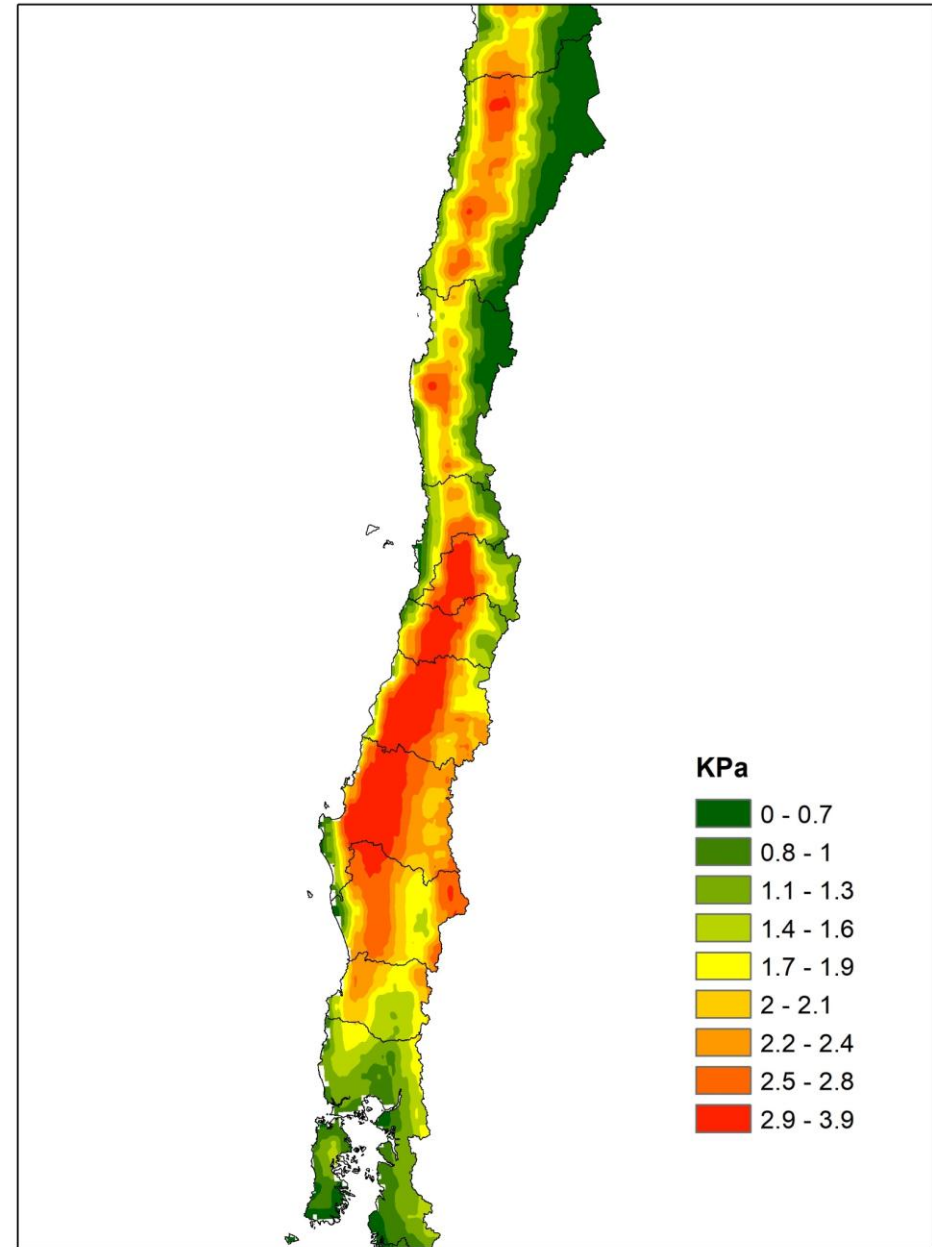
# Vapor pressure deficit

24 diciembre 2021 16 hrs

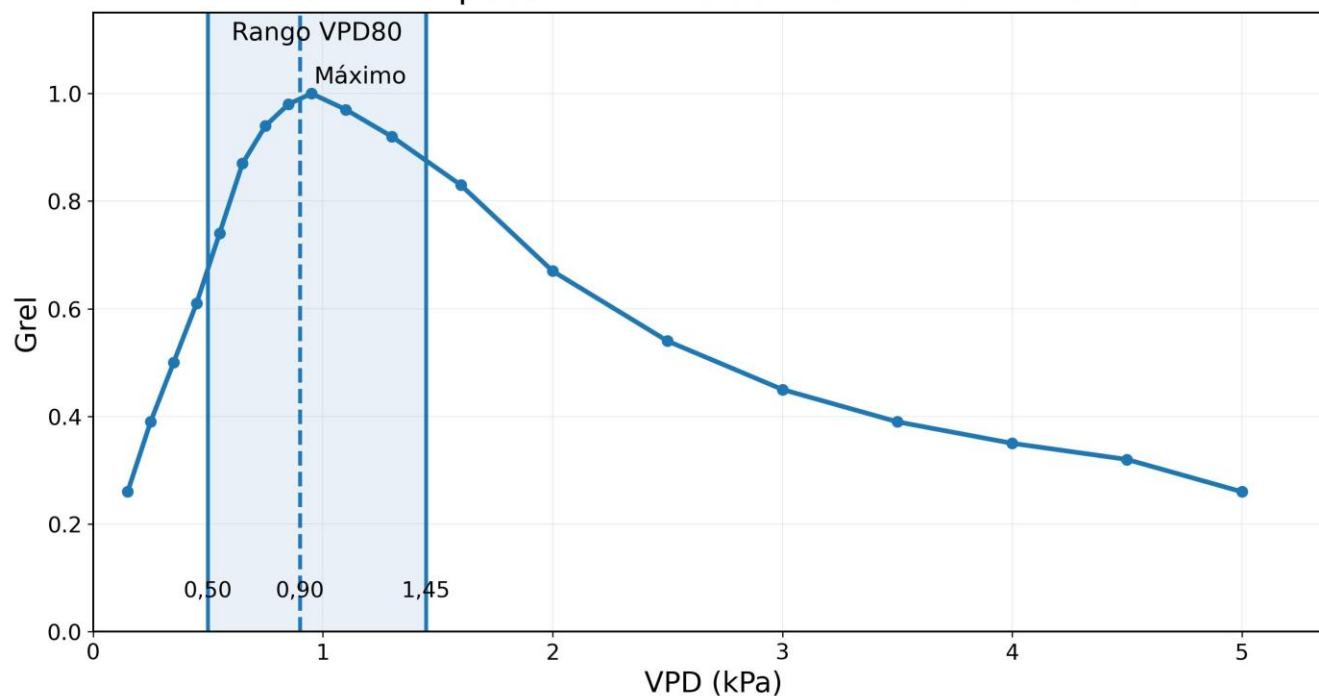


# Vapor pressure deficit

26 diciembre 2021 16 hrs



Sitio C2: respuesta relativa de la conductancia al VPD



$$f(VPD) = \begin{cases} \frac{VPD}{VPD_{inf}}, & 0 \leq VPD < VPD_{inf} \\ 1, & VPD_{inf} \leq VPD \leq VPD_{sup} \\ f_{min} + (1 - f_{min}) \left[ 1 - \left( \frac{VPD - VPD_{sup}}{VPD_{max} - VPD_{sup}} \right)^2 \right], & VPD > VPD_{sup} \end{cases}$$

## Estrés horario

A partir de  $f(D_h)$  se definió un índice de estrés horario relativo  $E_h$  como:

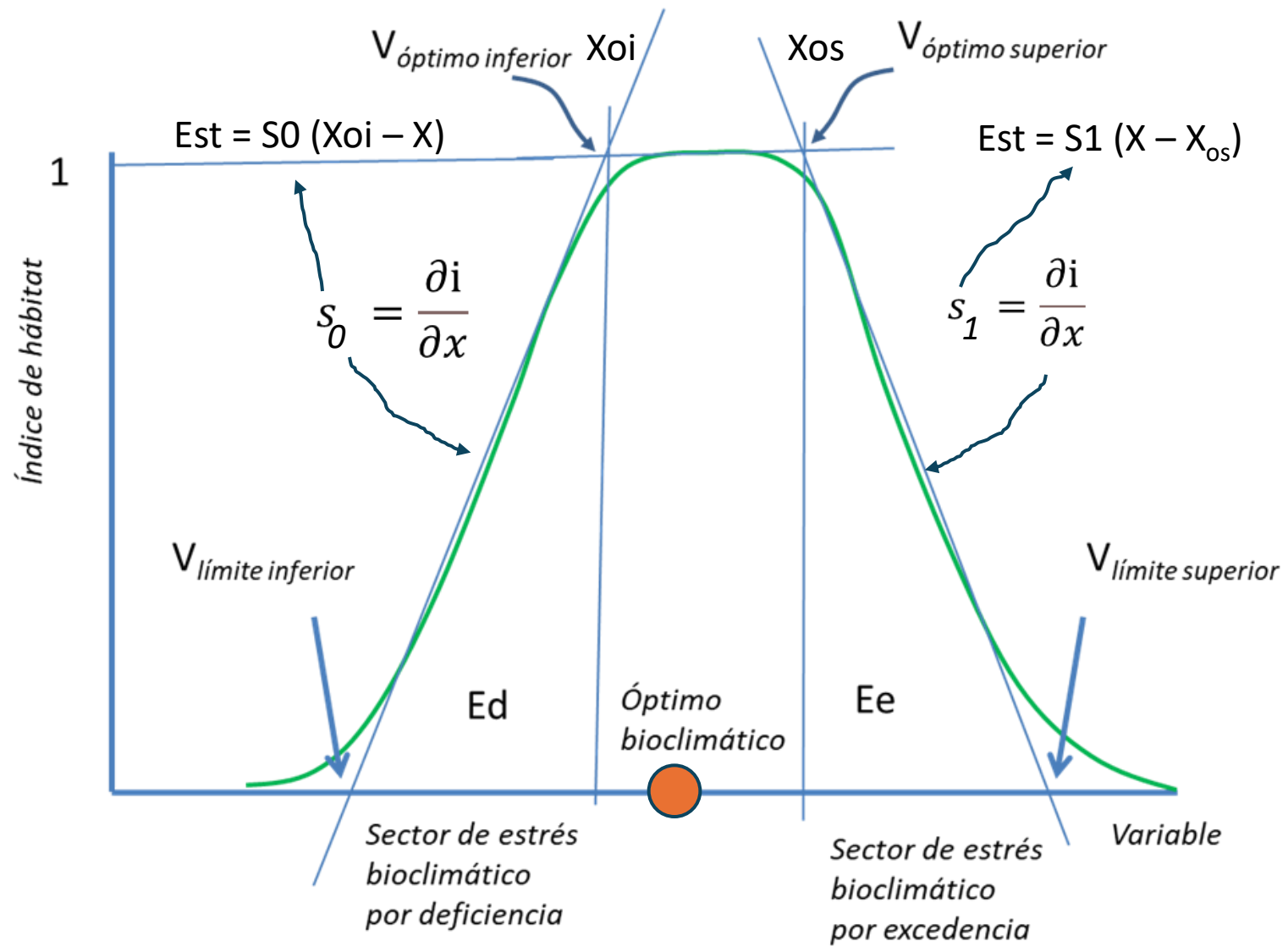
$$E_h = 1 - f(D_h),$$

$E_h = 0$  indica ausencia de estrés (apertura estomática máxima) y valores crecientes de  $E_h$  reflejan un cierre estomático progresivo. Para normalizar el índice de manera que el estrés máximo tome el valor 1, se utilizó:

$$E_h^* = \frac{1 - f(D_h)}{1 - f_{min}}.$$

**Estrés acumulado de la temporada (SI) (horas-equivalentes de estrés máximo):**

$$SI_{abs} = \sum_{h=1}^N E_h^*.$$



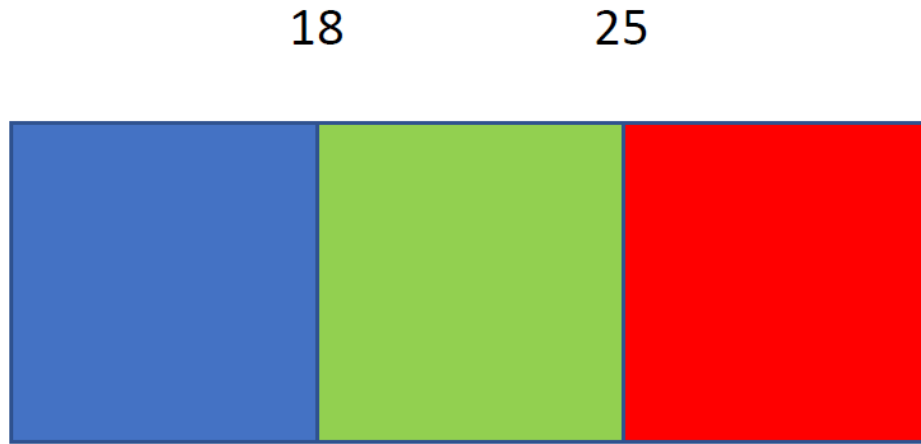
## Horas Eficazmente Productivas (HEP)

Las HEP corresponden al **número de horas del día en que la planta realmente maximiza su crecimiento y producción**, es decir, cuando la temperatura se mantiene dentro de un rango óptimo definido para cada especie y cada fase fenológica.

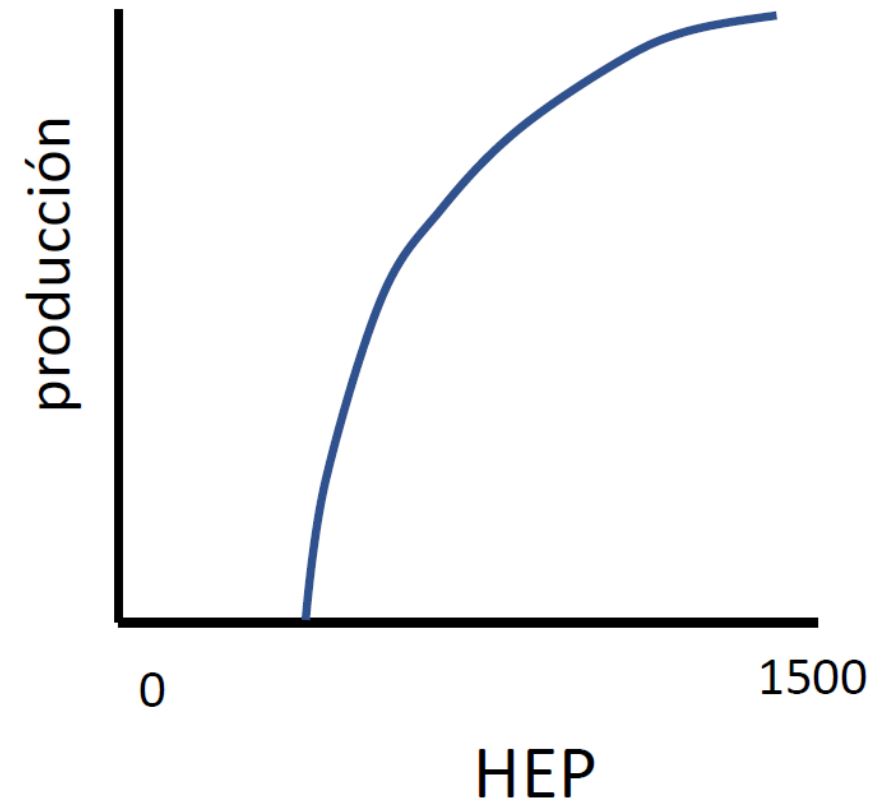
$$HEP = \text{Horas de luz} - \alpha \cdot \text{Horas de estrés por calor} - \beta \cdot \text{Horas de estrés por frío}$$

El estrés térmico reduce el calibre de la fruta, lo que se potencia con el estrés evaporativo

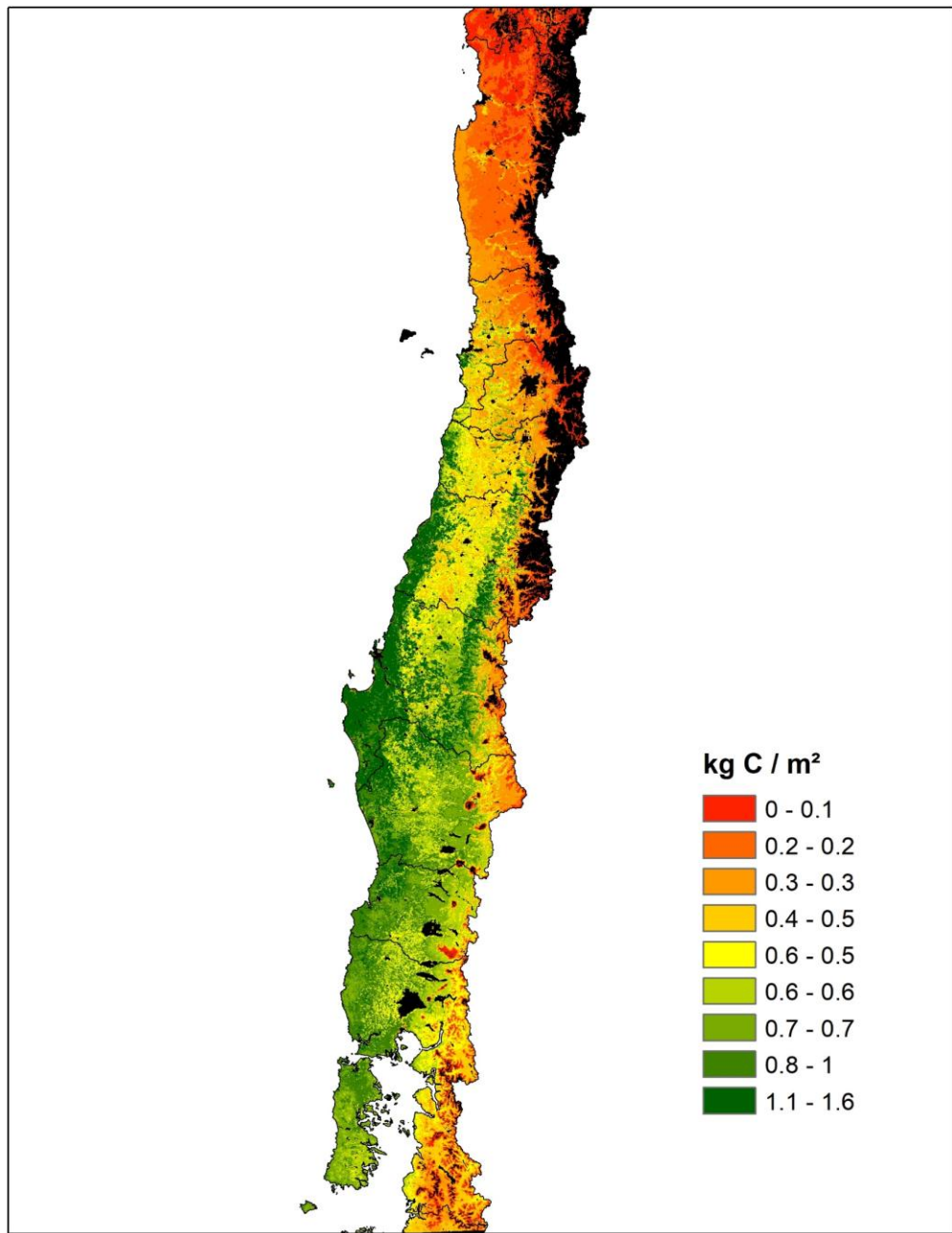
El frescor ( $T < 15^{\circ}\text{C}$ ) reduce la traslocación de los carbohidratos hacia los frutos, reduciendo el calibre y en ciertos casos pudiendo provocar caída de frutos.



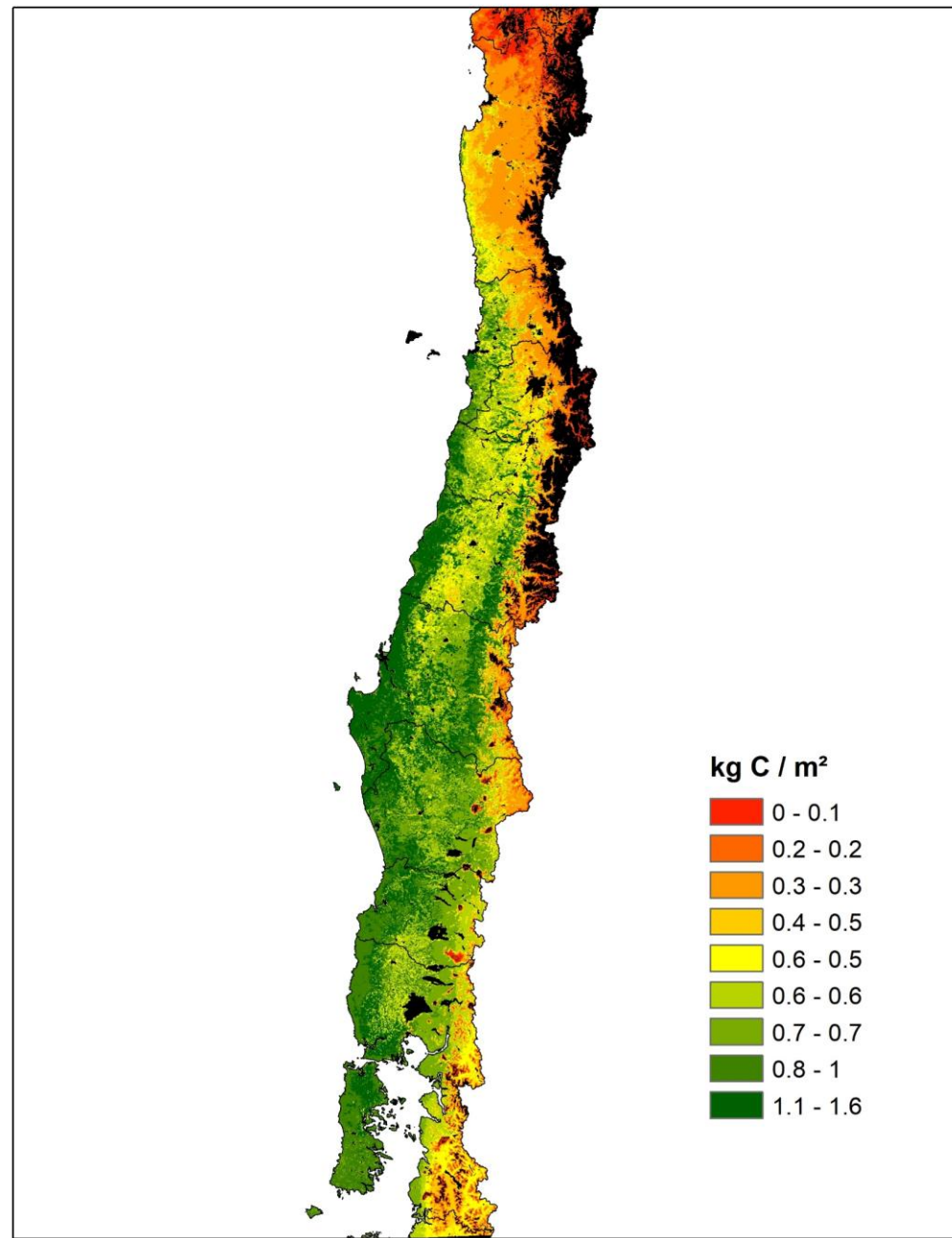
$$\text{Horas HEP} = \text{HL} - \alpha * \text{horas de EST} - \beta * \text{horas de ESF}$$



**Productividad primaria neta**  
**Agosto - diciembre 2019**



**Productividad primaria neta**  
**Agosto - diciembre 2024**



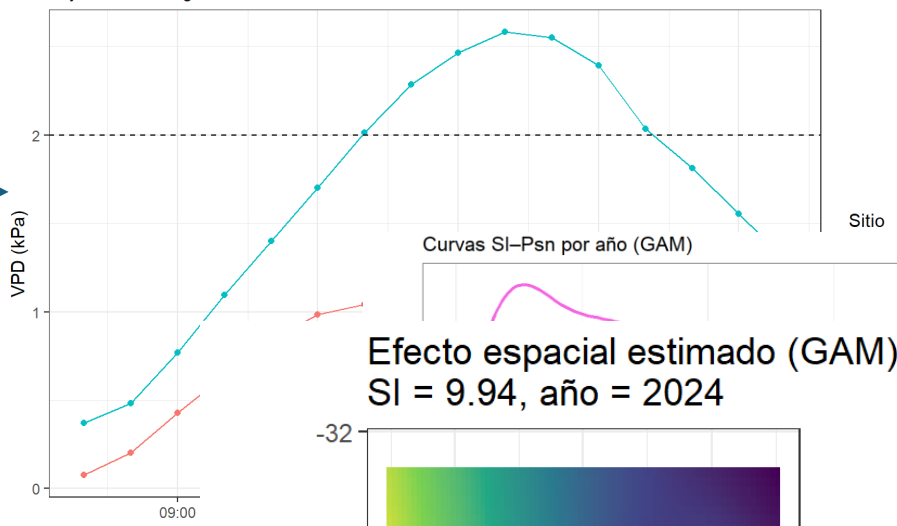
**Estrés acumulado**

**Índice de estrés bioclimático a escala territorial**

**Modelos de productividad**

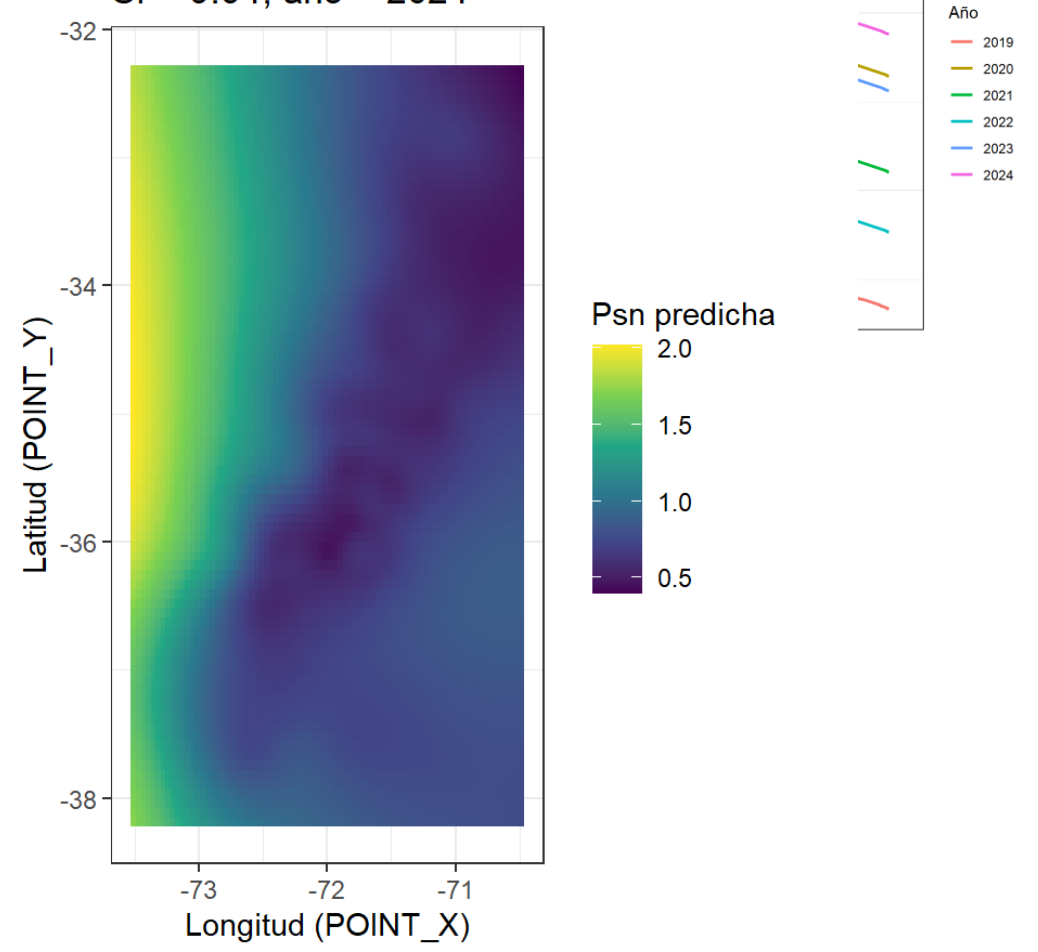
(GAM con MODIS PSN, índice de estrés estomático y HEP)

VPD horario (extendido hasta las 22:00)  
Leyda vs. Santiago



Curvas SI-Psn por año (GAM)

Efecto espacial estimado (GAM)  
SI = 9.94, año = 2024



**Productividad = f(HEP) + f(IndiceVPD) + f(HEP, IndiceVPD) + f(espacio) + f(año)**

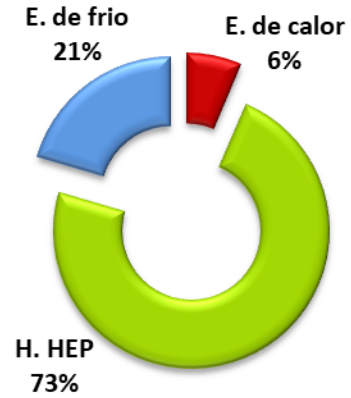
- **PSN** = productividad primaria neta de MODIS
- **HEP** = horas eficazmente productivas
- **IndiceVPD** = índice de restricción estomática por déficit de presión de vapor
- **f(HEP, IndiceVPD)** = interacción entre ambas
- **f(espacio)** = variación geográfica
- **f(año)** = variación temporal entre años



- En este contexto, resulta fundamental contar con un monitoreo continuo a nivel predial de las condiciones climáticas diarias, ya que solo así es posible anticipar oportunamente los eventos extremos y diseñar estrategias de manejo que reduzcan sus efectos dañinos sobre la producción agrícola.

# Casablanca

## Termoperiodos críticos



## Índices bioclimáticos de la temporada

Horas HEP: 1982

Horas de estrés térmico: 175

Horas de estrés de frío: 555

Días grado acumulados: 1617

Horas de frío (31/7): 834

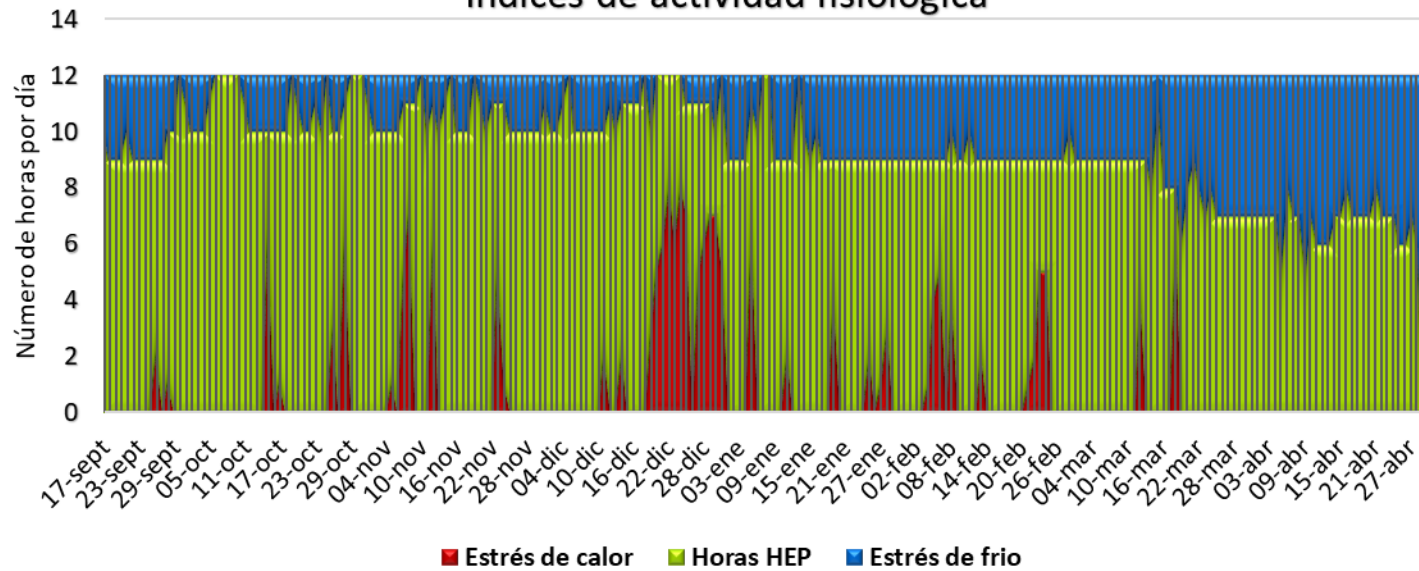
Unidades de frío (31/7): 729

Precipitación a la fecha (mm): 379

Índice fototérmico blanco: 71

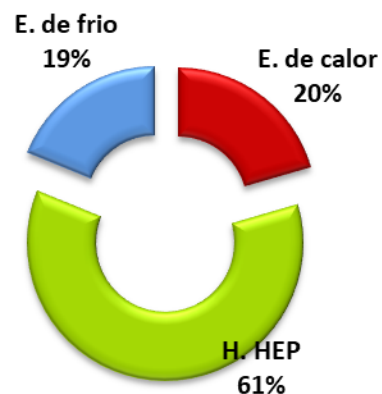
Índice fototérmico tinto: 83

## Índices de actividad fisiológica



## Cauquenes

### Termoperiodos críticos



### Índices bioclimáticos de la temporada

Horas HEP: 1645

Horas de estrés térmico: 556

Horas de estrés de frío: 511

Días grado acumulados: 1790

Horas de frío (31/7): 996

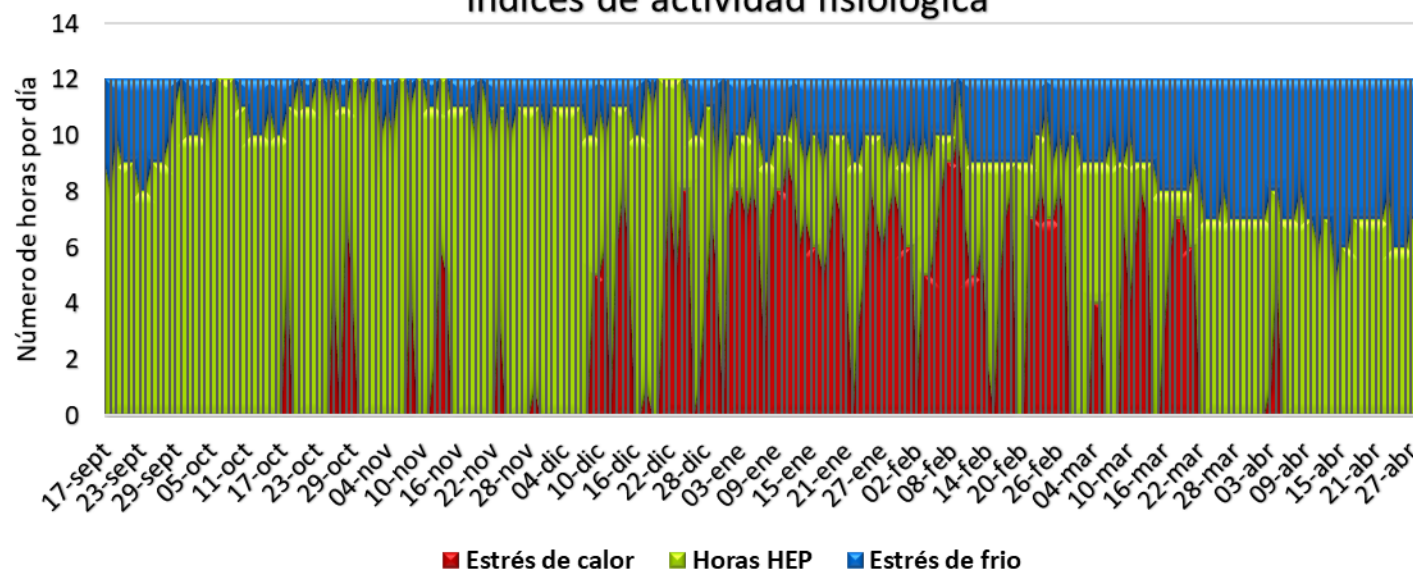
Unidades de frío (31/7): 1049

Precipitación a la fecha (mm): 594

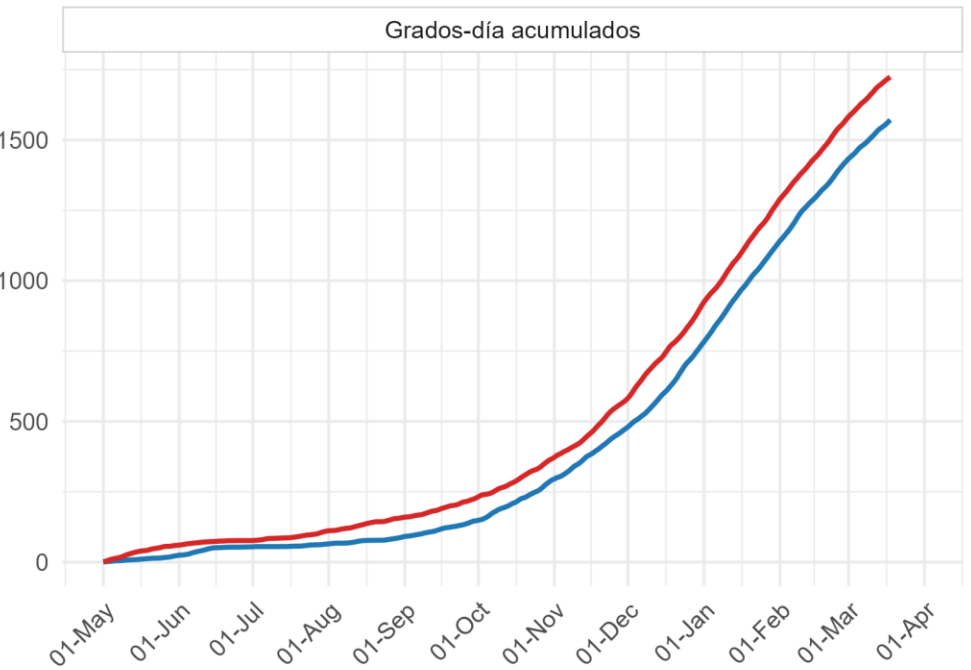
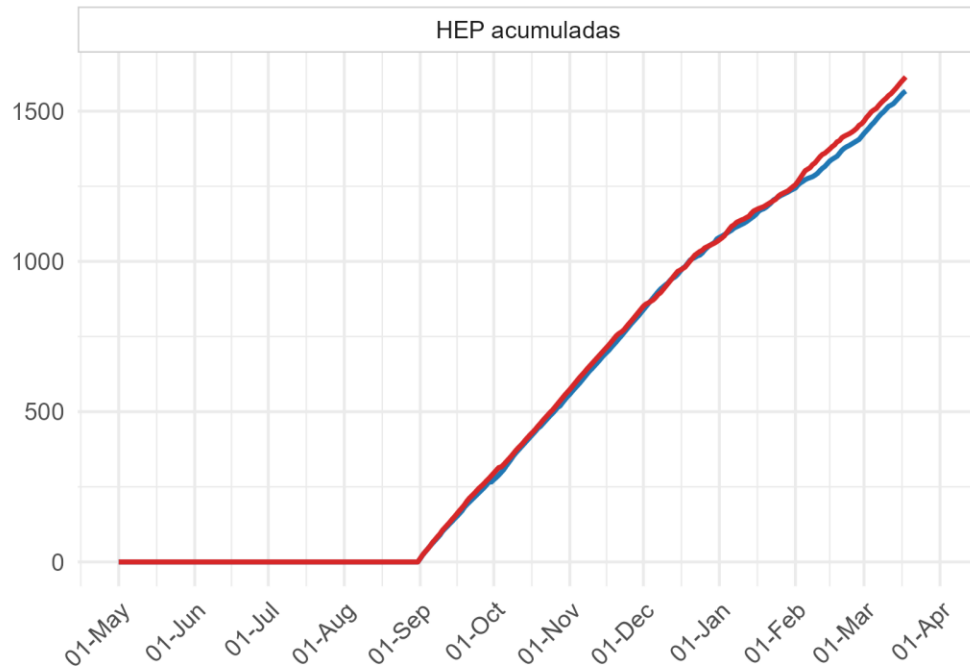
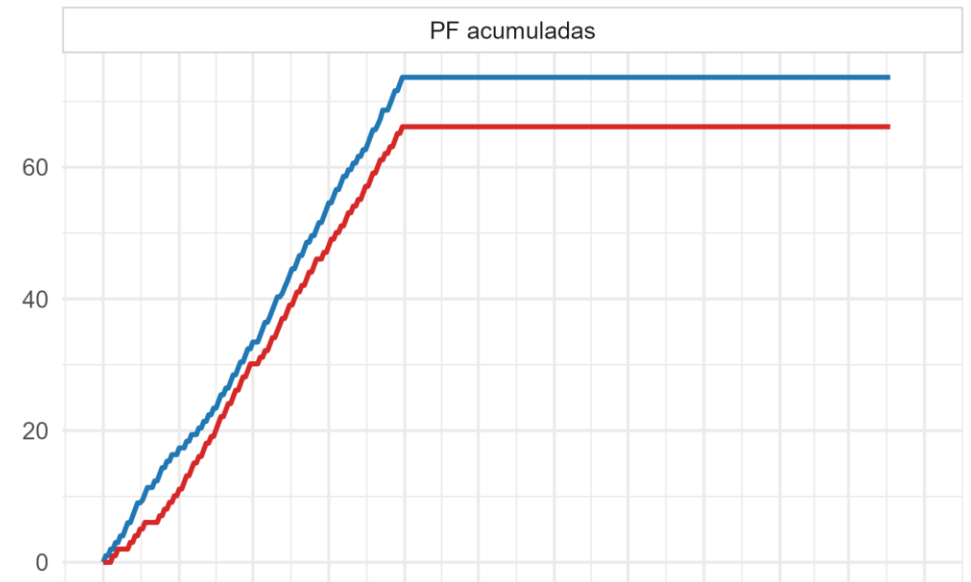
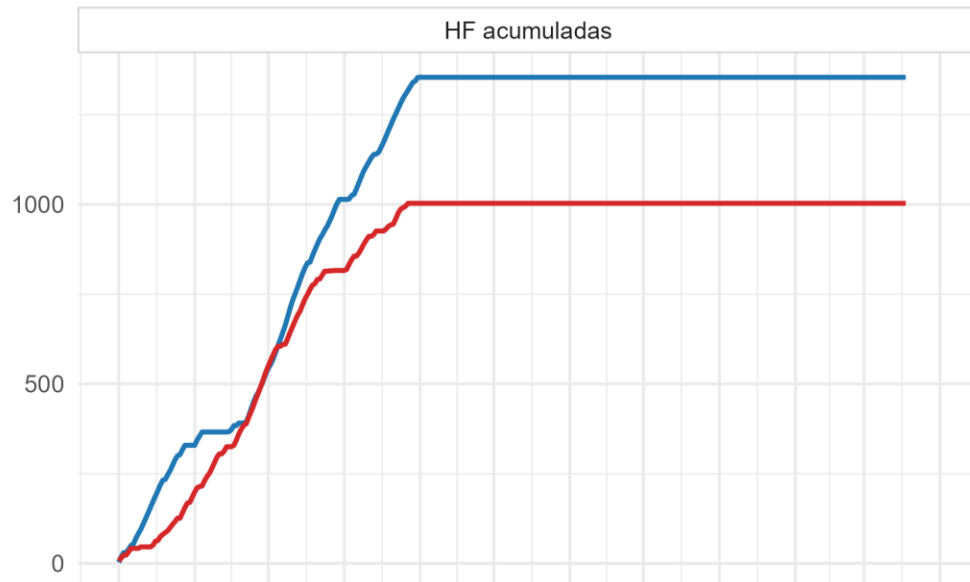
Índice fototérmico blanco: 73

Índice fototérmico tinto: 64.1

### Índices de actividad fisiológica



# Indicadores acumulados comparados - Pencahue



Temporada — 24-25 — 25-26

### Valores de Pronóstico Diarios

#### TEMPERATURA

MAX

MIN

#### HUMEDAD RELATIVA

MAX

MIN

#### PRECIPITACIÓN

DIARIA

#### EVAPOTRANSPIRACIÓN

DIARIA

#### VIENTO

PROMEDIO

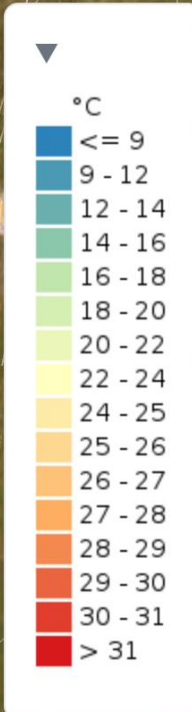
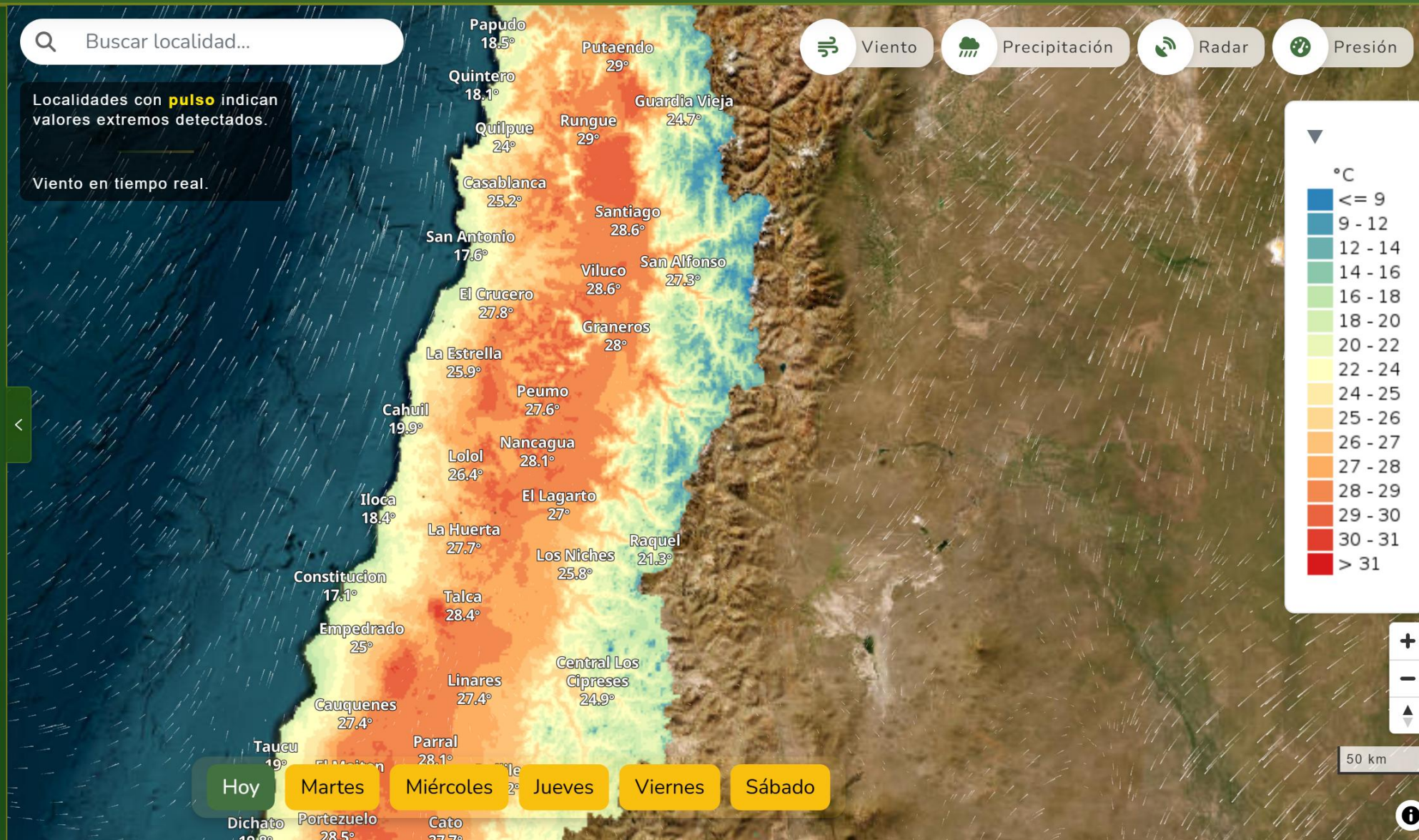
MAX

Buscar localidad...

Localidades con **pulso** indican valores extremos detectados.

Viento en tiempo real.

- Viento
- Precipitación
- Radar
- Presión



- Hoy
- Martes
- Miércoles
- Jueves
- Viernes
- Sábado

50 km



### Valores de Pronóstico Diarios

TEMPERATURA

MAX MIN

HUMEDAD RELATIVA

MAX MIN

PRECIPITACIÓN

DIARIA

EVAPOTRANSPIRACIÓN

DIARIA

VIENTO

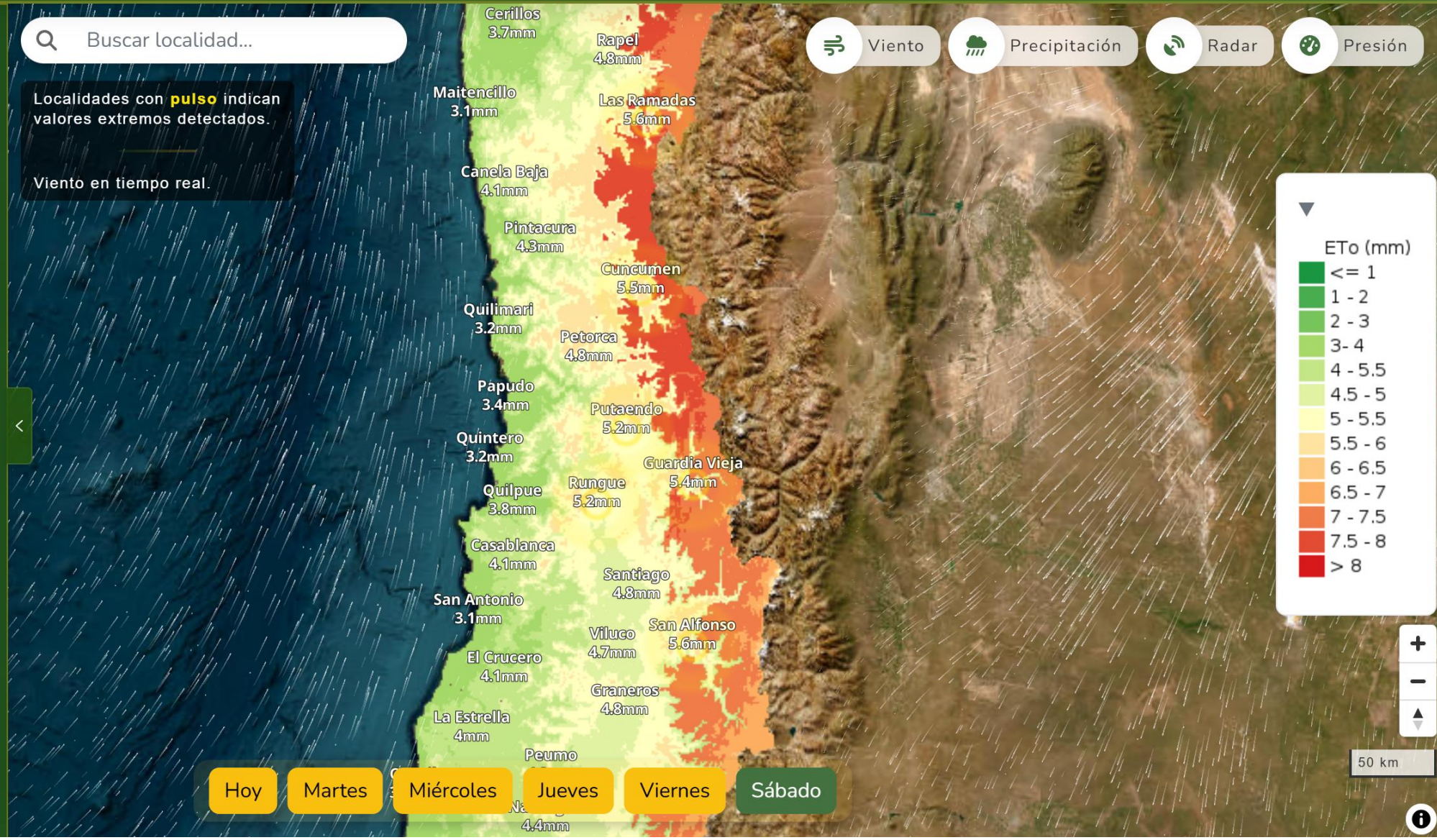
PROMEDIO MAX

Buscar localidad...

Localidades con **pulso** indican valores extremos detectados.

Viento en tiempo real.

- Viento
- Precipitación
- Radar
- Presión



- Hoy
- Martes
- Miércoles
- Jueves
- Viernes
- Sábado

ETo (mm)

- <= 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5.5
- 5 - 5.5
- 5.5 - 6
- 6 - 6.5
- 6.5 - 7
- 7 - 7.5
- 7.5 - 8
- > 8

50 km

+

-

▲

