

Modelo de balance calórico de heladas

Ana Laura Diedrichs

Laboratorio DHARMA, Dpto Sistemas,
Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional,
Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Argentina, 5500
{ana.diedrichs,facundo.bromberg}@frm.utn.edu.ar
<http://dharma.frm.utn.edu.ar>

Abstract. Las heladas son un evento meteorológico que ocasiona grandes pérdidas a la producción. Se caracterizan por descenso de la temperatura a niveles que pueden dañar los cultivos. La topografía del terreno es un factor importante que ocasiona que el fenómeno no afecte de la misma manera a toda la finca. Dado que el aire frío es más denso, el mismo se estratifica a las zonas más bajas. Por ello es importante evaluar la variación vertical de las temperaturas. En el presente trabajo realizaremos el análisis de seis sensores posicionados verticalmente para evaluar la variación de temperaturas en época de heladas. Los resultados nos muestran que existen correlaciones entre los sensores vecinos y es posible predecir el comportamiento de uno a partir del otro.

1 Introducción a la problemática de las heladas

El daño ocasionado por heladas toma lugar cuando las temperaturas se encuentran bajo un límite tolerable por las plantas, ya que las mismas presentan distinto grado de resistencia al frío según el estado fenológico en el que se encuentren [?]; por lo que la temperatura de daño es variable. Los eventos de heladas son muy dañinos afectando a grandes superficies. Mendoza no es una excepción. De acuerdo al Instituto Nacional de Vitivinicultura (INV), en 2013 la pérdida de viñedo alcanzó un 27%[?], ocurriendo gran parte de la pérdida durante la primavera temprana. Con el objeto de estudiar el fenómeno microclimático de las heladas, los sensores de temperatura deben ser distribuidos verticalmente y horizontalmente porque la temperatura del aire varía en ambas direcciones y la planta tiene diferentes umbrales de resistencia al frío en sus órganos (tronco, flores, yemas)

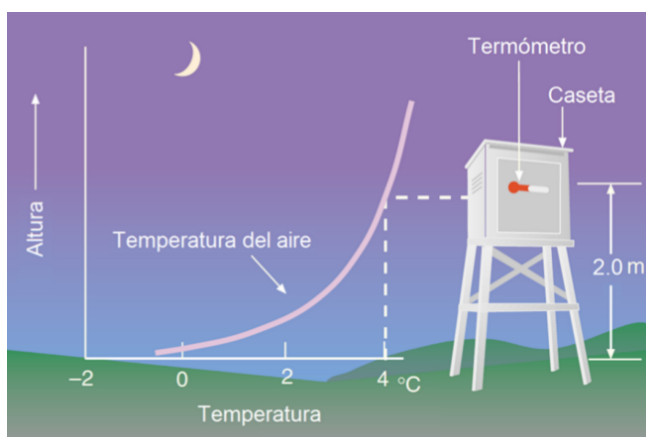
2 Hipótesis del Trabajo

Existe la posibilidad de desarrollar mecanismos más efectivos respecto al estado del arte actual para la predicción localizada de heladas en los cultivos, innovando en la técnica predictiva mediante un estudio de la distribución espacio-temporal de las variables involucradas y el análisis de sus relaciones *colaborativas entre sensores vecinos* para: anticipar la predicción de la helada y *localizar la zona*

31 *de ocurrencia* haciendo uso de tecnología de sensado inalámbrica y aprendizaje
32 automático (machine learning).

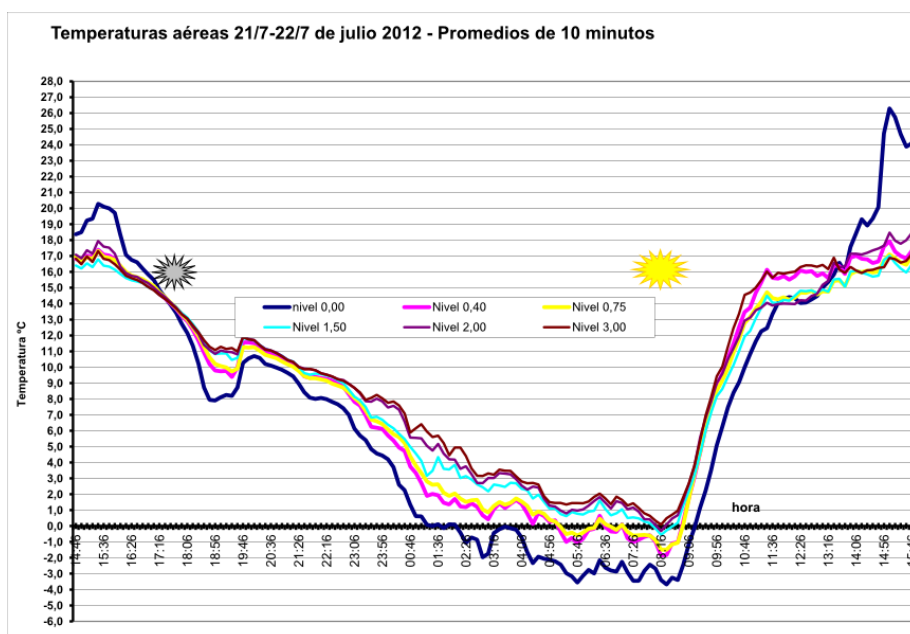
33 3 Problemática de las Heladas

34 Las heladas constituyen uno de los accidentes de tiempo que causan grandes
35 pérdidas económicas, a la agricultura en la Argentina y gran parte del mundo,
36 e impacto social al verse afectado los cultivos de los productores, debido a que
37 no son fenómenos locales sino extensivos. Existen varias definiciones de helada
38 como considerar helada a las temperaturas mínimas menores a 0°C . La más
39 apropiada desde el punto de vista agronómico es *considerar a la helada como*
40 *el evento meteorológico que ocurre cuando los cultivos y otras plantas experi-*
41 *mentan daño por congelación*. El daño causado por heladas ocurre cuando las
42 temperaturas están debajo de un límite tolerable para los cultivos. El umbral de
43 resistencia de las plantas al frío varía de acuerdo al estado fenológico en el que se
44 encuentren (floración, frutos o yemas presentes, etc) Según el Instituto Nacional
45 de Vitivinicultura (INV) en el 2013 la pérdida de viñedo por helada llegó a un
46 27% [?]. Las heladas tardías en Mendoza suceden entre septiembre y noviembre
47 siendo muy peligrosas porque empieza la floración y ya hay yemas brotadas.



48 Existen dos tipos de heladas. Las heladas advectivas se caracterizan por los al-
49 tos niveles de humedad, escarcha y cielo nublados. Las heladas radiativas suceden
50 bajo cielo despejado, escaso viento y muy baja humedad. Estas últimas son con-
51 sideradas muy peligrosas porque el balance calórico disminuye drásticamente en
52 la noche despejada al perderse el calor recibido durante el día. Para la medición
53 de variables ambientales comúnmente se utilizan estaciones meteorológicas. Ac-
54 tualmente las mismas están instaladas muy distanciadas unas de las otras, por
55 lo que no son suficientes para caracterizar un fenómeno micro-climático. A esto
56 se suma que la casilla meteorológica está a una altura promedio entre los 1.5m y

2m, como lo ilustra la figura[?] anterior; impidiendo caracterizar el fenómeno de la inversión térmica. En el siguiente gráfico [?] se muestran las temperaturas durante una noche de heladas de seis sensores posicionados verticalmente (a nivel del suelo, 40cm, 75 cm, 1.5m, 2 m, 3 m) donde podemos visualizar la variabilidad de la amplitud térmica a distintas alturas. Esto sucede porque el aire frío es más denso y fluye hacia las capas más bajas, en consecuencia drena hacia la parte más baja del terreno; mientras que el aire más caliente queda estratificado en la altura. Por esto es importante medir la variable de interés (temperatura) in situ y a distintas alturas. La predicción de heladas es importante porque permite activar con tiempo los mecanismos de prevención activa. Durante las noches de heladas suelen utilizarse quemadores, molinos de viento, aspersores, entre otras técnicas que permiten generar o mejorar la circulación del calor donde se encuentran los cultivos. Por otra parte, la predicción localizada de heladas permitiría saber no sólo si helará o no ese día, sino también las zonas de una finca o región que se verían afectadas.



4 Balance calórico

El descenso térmico que caracteriza una noche de helada está determinado por un balance calórico negativo del entorno. Intervienen varias causas de pérdida del calor del sistema que denominaremos como flujos salientes o entrantes cuya unidad es W/m^2 (watts por metro cuadrado).

77 Los elementos que componen el balance calórico están determinados por la
78 ecuación fundamental que describe el proceso:

$$Q_G + SH + LH + Q^* + S_C = 0$$

79 En las noches de heladas el ambiente se enfría, ocasionando que el suelo
80 pierda el calor adquirido durante el día gracias al sol. El flujo por conducción
81 en el suelo (Q_G) es el flujo de energía desde el subsuelo a la superficie (positivo)
82 y viceversa (negativo). Este flujo de calor por conducción del suelo se puede
83 cuantificar usando la ley de Fourier, que indica que el calor Q_G es proporcional
84 al gradiente de temperatura (primera ley de conducción del calor):

$$Q_G = -k * Area * \nabla T$$

85 .
86 La constante k es la conductividad térmica del suelo. El gradiente de tem-
87 peratura que representa el flujo de calor entre suelo y ambiente se caracteriza
88 como la siguiente fórmula $\nabla T = \frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy}$. Dada la presencia de derivadas
89 parciales, la misma se resolverá mediante diferencias finitas y considerando di-
90 mensiones 2D para simplificar el problema.

El flujo de calor sensible SH está asociado a la diferencia de temperatura que existe entre la temperatura a nivel de superficie y la temperatura a nivel de aire. Su valor es positivo si la energía fluye desde el aire hacia la superficie y negativo en caso contrario. Se calcula como $SH = C_H * \bar{W} * (\bar{T} - T_G)$, siendo W la velocidad promedio del viento, T la temperatura a nivel del aire, T_G la temperatura a nivel del suelo, y C_H es un coeficiente que en condiciones de estabilidad puede variar entre 10^{-3} a $5 * 10^{-3}$. Se considera que $\bar{T} - T_G = \nabla T$, es decir, reemplazar la expresión por el gradiente de temperatura quedaría determinada como

$$SH = C_H * \bar{W} * \nabla T$$

El flujo de calor latente (LH) está asociado con los cambios de fase del agua, es decir, cuando hay evaporación o condensación sobre la superficie del suelo. Se calcula como

$$LH = C_E * \bar{W} * (\bar{q} - q_G)$$

91 , siendo q la humedad del aire, q_G la humedad relativa a nivel del suelo, y C_E
92 un coeficiente de estabilidad similar a C_H . Dado que esta ecuación representa el
93 aporte/sustracción ante los cambios de estado del agua; al interesarnos simular
94 una situación de helada puede calcularse LH en el caso de que la temperatura
95 sea menor o igual a cero, porque el agua cambia a estado sólido; de lo contrario
96 $LH = 0$.

El flujo por radiación neta (Q^*) considera la suma de la radiación emitida/recibida en los dos rangos espectrales: radiación de onda corta (SW) y radiación de onda larga. Durante una noche de helada, dada la ausencia de radiación solar, la ecuación se simplifica considerando sólo la radiación de onda larga.

$$Q^* = LW \downarrow - LW \uparrow$$

97 $LW \downarrow$ es el flujo de onda larga que el suelo recibe y es emitida casi en su
 98 totalidad por toda la atmósfera, dependiente de la temperatura, humedad y
 99 cobertura nubosa. Las nubes juegan un papel muy importante durante la noche
 100 ya que modulan la temperatura de la superficie mediante la emisión radiación
 101 infrarroja.

102 $LW \uparrow$ representa el flujo de radiación de onda larga emitida desde la superficie
 103 terrestre hacia la atmósfera por lo que depende de la temperatura del suelo y su
 104 emisividad. Interesa señalar que es responsable del calentamiento y enfriamiento
 105 del aire, debido a que el aire no absorbe la radiación solar por ser de onda corta,
 106 pero sí absorbe la del suelo que es onda larga. Está regida por la ley de Stefan-
 107 Boltzmann $LW \uparrow = \epsilon * \sigma * T_G^4$, donde ϵ es el coeficiente de emisividad del suelo,
 108 $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{J}{m^2 s K}$ la constante de Stefan-Boltzmann y T_G la temperatura en
 109 grados Kelvin del suelo.

110 El flujo de calor por convección varía proporcionalmente según la constante
 111 de convección, definimos $S_C = h * \nabla T$

112 5 Consideraciones del modelo

- 113 – El problema se simplificará analizando la difusión del calor en el suelo y
 114 luego en el aire unidimensionalmente.
- 115 – La capacidad térmica y emisividad del suelo no variará con el tiempo.
- 116 – En la noche no hay radiación solar presente y la misma ha sido absorbida
 117 por el suelo durante el día
- 118 – Se analizará la variación de la temperatura en el tiempo, según condiciones
 119 de frontera iniciales (por ej. temperatura a nivel subsuelo, temperatura a
 120 nivel suelo)

121 Evaluar la variación de la temperatura del suelo de acuerdo a la difusión
 122 del calor desde el subsuelo al suelo, presentado como: $Q_G = -k * Area * \nabla T$.
 123 Para empezar a codificar y simular el comportamiento usando R , utilizamos
 124 la librería ReacTran [1]. Esta librería cuenta con rutinas para el desarrollo de
 125 modelos de reacción y transporte, con advección y difusión en una, dos o tres
 126 dimensiones. Principalmente provee:

- 127 * Funciones que subdividen el espacio en un número discreto de celdas en
- 128 una grilla * Aproximación por diferencias finitas o volúmenes finitos del término
- 129 de transporte advectivo-difusivo

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{A_x \xi_x} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_x \left(-D \frac{\partial \xi_x T}{\partial x} \right) - + \frac{\partial}{\partial x} (A_x v \xi_x T) \right)$$

130 En la fórmula anterior D es el coeficiente de difusión, v la tasa de advección,
 131 A_x el área de la superficie y ξ la fracción de volumen. Considerando que A, ξ, D
 132 y v son constantes en x , la fórmula podría ser reescrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - u \frac{\partial T}{\partial x}$$

Podemos observar que en el primer término tenemos una derivada de segundo orden y el segundo de primer orden. El primer término representa la tasa de difusión y el segundo término la tasa de consumo. Vamos a simular la propagación del calor desde el subsuelo al suelo basados en la siguiente fórmula:

$$Q_G = -k * Area * \nabla T$$

133 References

- 134 1. El INV presentó el ajuste de la Estimación de Cosecha 2014. online news, Instituto
135 Nacional de la Vitivinicultura, Mendoza, Argentina, February 2014.
- 136 2. Remugnán Daniel (Co-director) Rojas Daniel (Director). Defensa activa contra
137 heladas. Utilización de energía geotérmica de baja temperatura. Proyecto de inves-
138 tigación, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.
- 139 3. M. Saavedra. Caracterización física de heladas radiativas en el valle del mantaro.
140 Master's thesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2013.
- 141 4. Richard L Snyder and J Paulo Melo-Abreu. *Frost protection: fundamentals, practice*
142 *and economics. Volume 1*. FAO, 2005.