

CONTROL DE BAJAS TEMPERATURAS MEDIANTE EL RIEGO POR ASPERSIÓN FIJO EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA

Control of low temperatures by solid set sprinkler irrigation in central Bolivian highlands

Marco R. Vargas¹, René Chipana R.²

RESUMEN

En el presente trabajo se ha evaluado el control de bajas temperaturas mediante el riego por aspersión ERA (efecto de riego por aspersión) y el efecto debido a la humedad de una parcela irrigada un día antes por riego por aspersión ESH (efecto de suelo húmedo). Se han realizado veintidós ensayos, a una intensidad de riego de 5 mm h⁻¹, presión de funcionamiento de 200 kPa y el solapamiento entre aspersores de 12x12 m². Se han instalado sensores de temperatura-humedad relativa a nivel espacial y a tres alturas sobre el nivel del suelo (0,1; 0,25; 0,5 y 1,0 m). Estos ensayos estuvieron sometidos a diferentes intensidades y tiempos de exposición de heladas en la época más fría. Para el cálculo de la lámina de riego se utilizó el modelo propuesto por Gerber y Martsof (1979) y la aproximación realizada por Campbell y Norman (1998), para una helada de radiación. Las evaluaciones fueron realizadas en la Estación Experimental de Patacamaya de la Facultad de agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés. Los resultados muestran que a los tiempos de exposición de heladas de 0 a 3; 3 a 6; 6 a 9 y mayores a 9 horas muestran un incremento en la temperatura (ΔT°) de: 1,2 °C; 1,4 a 2 °C; 1,2 a 5 °C y 1,1 a 2 °C respectivamente para el ERA. Los incrementos en la humedad relativa (ΔHR) fueron de: 12%; 7 a 26%; 16 a 35% y 18 a 32 % respectivamente. Es así que el incremento de temperatura (ΔT°) para todos los ensayos realizados debido al ERA van desde 1 a 5 °C y en cuanto al incremento de la humedad relativa van desde de 7 a 35%. El incremento de la temperatura debido al ESH, se encuentra en el rango de 0,7 a 1,1 °C y de 12 a 18% para la ΔHR .

Palabras clave: Riego por aspersión, Control de helada; Temperatura del aire; Microclima; Altiplano de Bolivia.

ABSTRACT

In the present work, it has been evaluated the monitoring of low temperatures by sprinkler irrigation SIE (sprinkler irrigation effect) and humidity effect on the irrigated area when it is applied one day before by sprinkler irrigation EHS (effect humid soils). Therefore, twenty-two essays were performed, with an irrigation rate of 5 mm h⁻¹, the operation pressure of the system was 200 kPa, and the overlapping among sprinkler was 12 x 12 m². In this studied area temperature and relative humidity sensors were settled at space level and three heights over the soil level (0,1; 0,25; 0,5 and 1,0 m). In order to calculate the depth of irrigation the model proposed by Gerber and Martsof (1979) and the approach by Campbell and Norman (1998) for radiation frost were used. The evaluations were carried out in the Patacamaya Experimental Station that is dependent of Agronomy Faculty of San Andres University. The results showed that different times exposition to frost events from 0 to 3; 3 to 6; 6 to 9 and higher than 9 hours show an increment of ΔT° of 1,2 °C; 1,4 to 2 °C; 1,2 to 5 °C and 1,1 to 2 °C for SIE respectively. The relative humidity increased (ΔHR) around 12%; 7 to 26%; 16 to 35% and 18 to 32% respectively. Then, the temperature increased (ΔT°) for all evaluation due to sprinkler irrigation effect are from 1 to 5 °C and the relative humidity increased are from 7 to 35%. In addition, the temperature increased for the EHS registered a range from 0,7 to 1,1 °C and for ΔHR was from 12 to 18%.

Keywords: Sprinkler irrigation, Frost protection, Air temperature, Microclimate, Bolivian Altiplano

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la agricultura regada en Bolivia (97%) utiliza el riego por superficie; sin embargo, en los últimos años se vienen introduciendo métodos tecnificados (3%) como aspersión y goteo (VRHR 2013). La reciente incursión de esta tecnología

1 Maestrante del programa de Riegos – Facultad de Agronomía - UMSA.

2 Docente Titular. Facultad de agronomía. UMSA.

en el Altiplano Boliviano, el desconocimiento de este sistema de riego por los agricultores, la baja superficie irrigada por este método en Bolivia, la mayor eficiencia de riego en comparación al riego por superficie, la falta de estudios sobre el control de heladas con sistemas de riego por aspersión, la incertidumbre de ampliar el periodo agrícola con el control de heladas a bajas temperaturas en el Altiplano Boliviano posibilitan el presente trabajo. Siendo el objeto evaluar el control de bajas temperaturas mediante la aplicación de riego por aspersión en la Estación Experimental de Patacamaya del Altiplano central de Bolivia.

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Blanc et al., 1963; Bettencourt, 1980; Mota, 1981; Cunha 1982). Las heladas pueden clasificarse según su origen, época de ocurrencia y el aspecto visual que produce en las plantas. Las bajas temperaturas que pueden provocar serias lesiones por encima de 30 minutos es llamado temperatura crítica “ T_c ” (Barfield et al., 1990). Dicha temperatura varía con el cultivo, la variedad y ecotipo.

Para Ramírez et al., (2001) existen varios métodos para reducir los efectos de las heladas en cultivos, los cuales se agrupan en indirectos (o pasivos) y directos (o activos). La protección pasiva incluye métodos que se han implementado antes de la noche de la helada (Snyder et al., 2010). Los métodos de protección activa incluyen: estufas (Angus 1955), ventiladores (Goodhal et al. 1957), helicópteros, riego por aspersión (Davies et al. 1984, Cordy 1965, Brooks 1961), riego por superficie (Gerber y Harrison 1964), aislamiento con espuma (Barfield et al., 1990).

El principio de protección del riego por aspersión, se basa en aprovechar el calor latente de congelamiento del agua, la cual al ser aplicada por aspersión, cambia del estado líquido al estado sólido desprendiendo energía, cuyo valor es de $334,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ (80 cal g^{-1}) de masa; mientras se suministra agua por congelar, la temperatura se mantiene en 0°C , y una vez cuando la totalidad de la masa de agua se solidifica, comenzará a

descender la temperatura del sólido (Calderón, 1989). El método de riego por aspersión asegura una protección a la helada de hasta -8°C , mientras que Gil (1989) indica que es hasta -6°C , sin embargo Snyder et al., (2010) señala que su protección puede ser incluso en heladas de advección hasta cerca de -7°C si las tasas de aplicación son suficientes, la aplicación es uniforme y mientras haya una mezcla de líquido-hielo sobre las plantas, con agua goteando del cultivo, las partes de las plantas cubiertas mantendrán su temperatura cerca de los 0°C (Snyder et al., 2010). Perry (1979) ha demostrado que es necesario mucho menos agua, para una adecuada protección contra heladas que lo usualmente aplicado, y desarrolló un modelo inicial para calcular el volumen de agua necesario para el control de heladas (Perry et al. 1980, 1982) ello combinado con los mejores atributos de Businger (1965) y el modelo desarrollado por Gerber y Harrison (1964), logran desarrollar el modelo SPAR79 en 1979 que cuyas siglas significaban “Modelo de la cantidad de agua a aplicar en riego por aspersión” (Sprinkling Application Rate model), esta misma fue ajustada más adelante como SPAR81 y años más tarde se propuso un nuevo modelo conocido como FROSTPRO “Frost protection” (Perry 1986). Gerber y Martsolf (1979) presentaron un modelo para determinar el caudal de aspersión para la protección de una hoja de árbol de $0,02 \text{ m}$ de diámetro, que viene dada por:

$$R_A = (0,0538 u^2 - 0,5404 u - 0,4732) T_l \quad (1)$$

donde: R_A : Intensidad de aplicación del aspersor (mm h^{-1}); u : velocidad de viento (m s^{-1}); T_l : temperatura de una hoja sin proteger. Utilizando la aproximación descrita por Campbell y Norman (1998), la diferencia entre la temperatura del aire y la de una hoja en una noche de helada típica puede estimarse por:

$$T_a - T_l = 1,4458 u^{-0,4568} \quad (2)$$

Para $0,1 \leq u \leq 5 \text{ m s}^{-1}$; y temperatura del aire (T_a) en $^\circ\text{C}$. Combinando las ecuaciones 1 y 2, se puede calcular la intensidad de aplicación de aspersión que viene dada por:

$$R_A = (T_a - 1,4458 u^{-0,4568})(0,0538 u^2 - 0,5404 u - 0,4732) \quad (3)$$

El encendido y apagado del sistema de riego, se inicia “turn on” cuando la temperatura del ambiente y de las gotas de agua asperjadas llegan por debajo de $1,1^\circ\text{C}$ (Gerber y Harrison

1964) y el riego continua a lo largo del evento de protección hasta que la temperatura del hielo cubierto sobre las plantas comience a fusionarse “turn off” (Gerber y Martsolf 1979). Para Snyder

et al., 2010 el encendido y apagado del sistema de evaluación está en función de la temperatura crítica del cultivo.

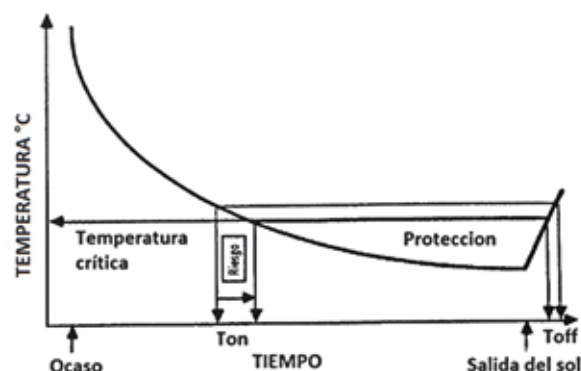


Figura 1. Curva de enfriamiento en la noche, idealizada para una helada de radiación, mostrando el nivel de la temperatura crítica (Martsolf y Jackson 1985).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos fueron realizados en la Estación Experimental de Patacamaya dependiente de la Facultad de Agronomía, de la Universidad Mayor de San Andrés, situada al sur del departamento de La Paz (Altiplano central de Bolivia) políticamente ubicada en la provincia Aroma. Geográficamente se ubica entre los paralelos: Latitud Sur 17.15 y Longitud Oeste 67,57. La altitud promedio es de 3789 m.s.n.m.

Se realizó el diseño del sistema de riego tal que funcionen por lo menos dos laterales del sistema de riego simultáneamente, con el objeto de realizar la evaluación, según los parámetros de desempeño. Y se instalaron sensores de temperatura y humedad relativa en el ambiente, según la Figura 2 B y C.

Procedimiento experimental

La presión de funcionamiento del sistema se encuentra 2×10^5 Pa (2 bares), el caudal de cada aspersor se encuentra entre 23 a 24 l min⁻¹ (0,4 l s⁻¹) y la intensidad de aplicación fue de 5 mm h⁻¹, el radio de riego llega a 15 metros.

El riego se inició cuando el valor de la temperatura ambiental llegase a 0°C (Ton) y finalizó cuando la temperatura volviera a alcanzar el valor de 0 °C.

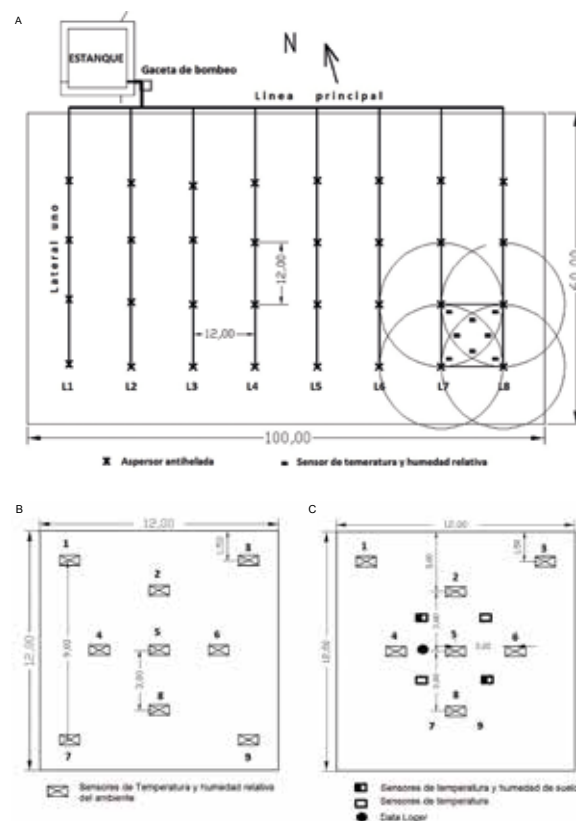


Figura 2 A) Ubicación del sistema de evaluación en el sistema de riego. B) Ubicación de los sensores de temperatura y humedad de medio ambiente. C) Ubicación de los sensores de temperatura de suelo, humedad y el data logger

Las evaluaciones se iniciaron con la ubicación inicial de los sensores para una altura de 0,1 m con referencia a la superficie del suelo y en adelante se fue cambiando de posición para: H1 = 0.1 m; H2 = 0,25 m; H3 = 0,5 m y H4 = 1,0 m; como se muestra en la Tabla 2.

La determinación del incremento temperatura y humedad relativa se lo calculó según las ecuaciones 6 y 7.

$$\Delta T = T_{min(testigo)} - T_{min(media)} \quad (4)$$

$$\Delta HR = HR_{min(testigo)} - HR_{min(media)} \quad (5)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La aplicación del método de protección activa de heladas, bajo el método de riego por aspersión, en el Altiplano Boliviano tiene gran potencial debido a que esta limitación climática reduce la producción agrícola, especialmente cuando se presenta en forma temprana (época denominada La Candelaria), la mayoría de los cultivos se encuentran en la fase fenológica de floración, en forma tardía en noviembre cuando

los cultivos se encuentran en emergencia y en plántula, ambos estados muy sensibles a las bajas temperaturas. A pesar de ser de amplio uso en otras zonas agrícolas, en el altiplano no ha prosperado su uso, parcialmente por la poca información técnica al respecto, lo que intenta ser cubierto con este trabajo.

Se ha calculado la intensidad de aplicación de aspersión, tomado como referencia la temperatura mínima de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una para la velocidad media de viento de los meses agosto-septiembre, como se muestra en la Figura 3.

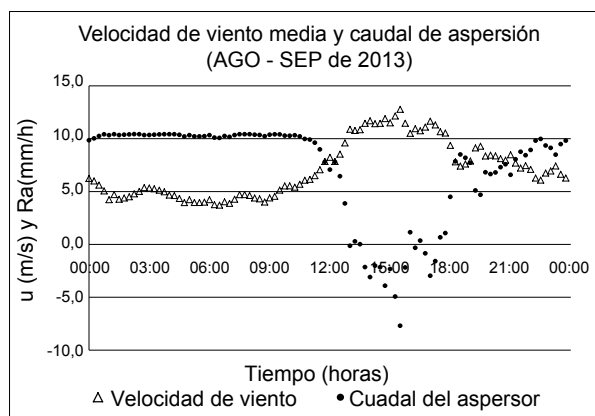


Figura 3. Datos de la velocidad media de viento y caudal de aspersión (mm h^{-1}) determinado según el modelo de Gerber y Martsof (1979), asumiendo una temperatura mínima de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, para el mes de agosto y septiembre del 2013.

Temperatura y humedad relativa ambiental a diferentes tiempos de exposición (TEH) e intensidad de heladas (IH) debida al efecto de riego por aspersión

En adelante se entenderá como “tiempo de exposición” (TEH) al tiempo de duración de la helada a partir de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y este descienda por debajo de dicha temperatura y vuelva a ascender nuevamente hasta $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto a “Intensidad de helada” (IH) se referirá a la máxima temperatura mínima que descendió en una noche de helada.

El total de ensayos realizados en la fase experimental fueron 22, entre ellos se han realizado ensayos con aplicación de riego (que en adelante se referirá a él como efecto de riego por aspersión ERA), a partir del ensayo 15 se ha procedido a estudiar el efecto de la reducción de temperatura en una parcela irrigada un día antes por riego por aspersión (que en adelante se referirá como efecto de suelo húmedo ESH). En la Tabla 2 se muestra las características de cada ensayo, es importante mencionar que la

máxima intensidad de helada (IH) fue de casi $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la mínima intensidad (IH) presente fue de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto al tiempo de exposición en presencia de heladas (TEH) esta fue en un máximo de 12 horas y mínimo de 46 minutos. El inicio de la helada más pronta fue desde horas 19:58 pm y la más tardía en presentarse a horas 6:13 pm.

Relación de tiempo de exposición (TEH) e intensidad de helada (IH)

Según la Figura 4 y Tabla 1, para las diferentes evaluaciones se observa una relación directamente proporcional del tiempo de exposición de helada (TEH) respecto a la intensidad de helada (IH). Esto nos indica que a heladas más intensas se espera también mayores tiempos de exposición, ello a su vez indica que existe una mayor pérdida de energía a mayor tiempo de exposición. En la Figura 4 se aprecia el comportamiento de ambas variables, mostrándose en el eje de las abscisas, la temperatura mínima para cada ensayo y en el eje de las ordenadas, los tiempos de exposición. A pesar de que el coeficiente de correlación es de 65,16% valor no muy alto, se puede mostrar la dependencia y tendencia de ambas variables.

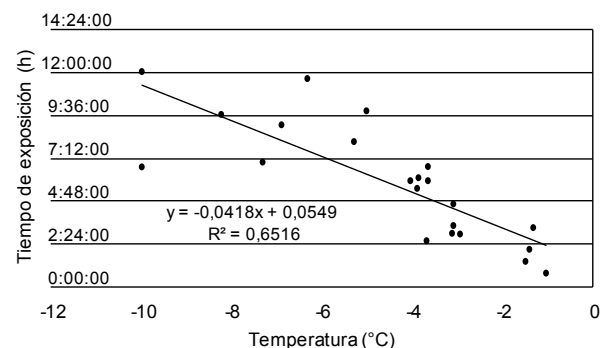


Figura 4. Relación de tiempo de exposición (TEH) e intensidad de helada (IH).

Temperatura y humedad relativa ambiental a diferentes tiempos de exposición (TEH)

En las Figuras 5 al 11 y en la Tabla 3, se muestran el comportamiento de los ensayos seleccionados debida al efecto de riego por aspersión (ERA) en presencia de heladas para las cuatro categorías de tiempo de exposición a heladas (TEH), que se verán en el presente acápite.

De acuerdo a la Tabla 3 se ha evidenciado que a menores TEH categoría 1 (0 a 3 horas) la velocidad de viento es baja o nulo,

presentándose heladas de radiación en general. En comparación a TEH de las categorías 2, 3 y 4 (3 a 6 horas, 6 a 9 horas y mayores a 9 horas), donde los vientos llegaron hasta 12 m s^{-1} , los característicos de las heladas advectivas. En los casos en que se presentan heladas advectivas se debería incrementar la intensidad de aplicación como indica Gerber y Martsolf (1979).

Tabla 1. Categorías de: tiempos de exposición e intensidades de heladas, según características del Altiplano (Fuente: Elaboración propia en base a datos de la estación meteorológica de Patacamaya).

N°	Categoría	Intensidad de helada (°C)	Tiempo de exposición (horas)
1	A	0 a -2	0 a 3
2	B	-2 a -4	3 a 6
3	C	-4 a -8	6 a 9
4	D	<-8	> 9

Tabla 2. Características de cada evaluación respecto al tiempo de exposición e intensidad de helada para los meses de agosto y septiembre del 2013.

Ensayo	Intensidad de helada (°C)	Categoría	Inicio de helada (hrs.)	Final de helada (hrs.)	Tiempo de exposición (horas)	Categoría	Inicio de ensayo	Salida del sol	Final de ensayo
1	-2,946	2	4:31:30	7:29:00	2:57:30	1	06:15:00	07:10:00	08:00:00
2	-1,498	1	4:14:50	5:40:20	1:25:30	1	01:10:00	07:10:00	08:00:00
3	-9,988	4	20:18:40	8:22:40	12:04:00	4	01:10:00	06:50:00	06:50:00
4	-9,988	4	1:14:50	7:58:10	6:43:20	3	02:10:00	07:10:00	08:00:00
5	-6,897	3	22:38:00	7:43:00	9:05:00	4	02:40:00	07:10:00	07:30:00
6	-7,315	3	0:50:50	7:50:20	6:59:30	3	02:40:00	07:05:00	07:30:00
7	-3,896	2	2:15:20	7:46:30	5:31:10	2	02:40:00	07:10:00	07:30:00
8	-5,294	3	23:34:00	7:42:30	8:08:30	3	03:15:00	07:05:00	07:30:00
9	-5,017	3	22:18:30	8:10:30	9:52:00	4	03:00:00	07:02:00	07:30:00
10	-3,657	2	1:30:30	8:15:00	6:44:30	3	03:00:00	07:02:00	07:30:00
11	-1,412	1	4:54:00	7:00:00	2:06:00	1	03:40:00	06:55:00	07:30:00
12	-8,231	4	22:11:00	7:51:00	9:40:00	4	-	-	-
13	-6,325	3	19:58:00	7:38:30	11:40:30	4	23:35:00	06:50:00	07:30:00
14	-1,043	1	6:13:00	6:59:00	0:46:00	1	23:35:00	06:50:00	07:30:00
15	-3,687	2	4:37:00	7:12:00	2:35:00	1			
16	-3,094	2	2:31:58	7:10:56	4:38:59	2	01:10:00	06:50:00	06:50:00
17	-4,046	3	1:22:58	7:19:56	5:56:58	2			
18	-3,657	2	1:22:58	7:19:56	5:56:58	2	01:20:00	06:50:00	07:10:00
19	-3,866	2	0:56:00	7:03:00	6:07:00	3			
20	-3,123	2	4:09:00	7:09:00	3:00:00	1	02:00:00	06:45:00	07:00:00
21	-1,327	1	3:32:00	6:51:00	3:19:00	2	01:20:00	06:45:00	07:00:00
22	-3,094	2	3:20:00	6:46:00	3:26:00	2			
MAX	-1,043		19:58:00	07:19:56	12:04:00		06:15:00	07:10:00	08:00:00
MIN	-9,988		06:13:00	05:40:20	00:46:00		23:35:00	06:45:00	06:50:00

Tabla 3. Comportamiento de los ensayos seleccionados debida al ERA en presencia de heladas en las cuatro categoría de TEH.

Categoría	Ensayo	Fecha	ΔT (°C)	IH (°C)	ΔHR (%)	HR max (%)	V (m/s)	TEH (horas)	Inicio de helada (hrs.)	Final de helada (hrs.)
1 (0 a 3 horas)	1	08-ago	1	-2,946	12	80	-	02:57:30	04:31:30	07:29:00
	20	10-sep	2	-3,123	11,9	90	0	03:00:00	04:09:00	07:09:00
2 (3 a 6 horas)	16	06-sep	1,4	-3,094	26	91	0 – 3	04:38:59	02:31:58	07:10:56
	18	08-sep	2	-3,657	7	78	0 – 8	05:56:58	01:22:58	07:19:56
3 (6 a 9 horas)	4	13-ago	5	-9,988	35	78	0 – 9	06:43:20	01:14:50	07:58:10
	6	20-ago	2,3	-7,315	31	73	0 – 12	06:59:30	00:50:50	07:50:20
	8	22-ago	1,2	-5,294	34,4	73	0 – 9	08:08:30	23:34:00	07:42:30
	10	28-ago	2,4	-3,657	16,3	93	0	06:44:30	01:30:30	08:15:00
4 (> a 9 hora)	5	16-ago	2	-6,897	32	75	0 – 12	09:05:00	22:38:00	07:43:00
	9	27-ago	1,5	-5,017	20	92	0 – 5	09:52:00	22:18:30	08:10:30
	12	02-sep	1,1	-8,231	18	73	0 – 5	09:40:00	22:11:00	07:51:00
	13	03-sep	2	-6,325	25	74	1 – 10	11:40:30	19:58:00	07:38:30

Para un TEH de 0 a 3 horas, que corresponde a la categoría uno (Tabla 3) se han seleccionado los ensayos 1 y 20, de fechas 08/08 y 20/09/2015, cuyos resultados se muestran en la Figura 6, sus TEH fueron de 02:57:30 horas y para el segundo de 3 horas, respectivamente. En los incisos A y C se muestra el comportamiento de la temperatura desde la media noche, como también se muestra el inicio y el final el ensayo, los IH llegaron a -2,9 y -3,1 respectivamente, en cuanto al incremento de temperatura promedio ($\Delta T = T_{\min_{\text{testigo}}} - T_{\min_{\text{media}}}$) fue de 1 y 2 °C respectivamente. En los inciso B y D se muestra el comportamiento de la humedad relativa, cuyos valores máximos llegaron a 80 y 90 % respectivamente, el incremento de humedad relativa media ($\Delta HR = HR_{\min_{\text{testigo}}} - HR_{\min_{\text{media}}}$) fue de 12 y 11,9 % respectivamente.

En la Figura 5, se muestra el comportamiento de la velocidad de viento para los ensayos 1 y 20, de fechas 08/08 y 20/09/2015, donde se puede evidenciar que en el periodo de evaluación, de helada fue de horas 4:09:00 a 7:09:00 am en donde la velocidad de viento fue nula, lo que indica que se presentó una helada de radiación durante la noche. Por otra parte, no se cuenta con datos de velocidad de viento para la fecha 8 de agosto, pero se presume que también la velocidad de viento fue bastante baja o nula.

Para un TEH de 3 a 6 horas, que corresponde a la categoría dos (Tabla 3) se han seleccionado los ensayos 16 y 18, de fechas 6 y 8 de septiembre, cuyos resultados se muestran en la Figura 7, sus TEH fueron de: 04:38:59 a 05:56:58 horas respectivamente. En los incisos A y C se muestra el comportamiento de la temperatura desde la media noche, como también se muestra el inicio y el final el ensayo, las IH llegaron a -3,1 y -3,7 respectivamente, en cuanto al incremento de temperatura promedio fue de 1,4 °C y 2 °C respectivamente. En los inciso B y D se muestra el comportamiento de la humedad relativa, cuyos valores máximos llegaron a 91 y 78 % respectivamente, al incremento de humedad relativa media fue de 26% y 7 % respectivamente.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la velocidad del viento desde media noche, indicando el inicio y final del ensayo para los ensayos 16 y 18. Se muestra que en el periodo de evaluación desde el inicio de la helada existen

vientos, para el caso del ensayo 16 se presentan vientos desde 0 a 3 m s⁻¹ y para el caso del ensayo 18 se presentan vientos desde 0 a 8 m s⁻¹, por lo que en ambos casos se presentaron una combinación de heladas de radiación y advección.

Para un TEH de 6 a 9 horas, que corresponde a la categoría tres (Tabla 2) se han seleccionado los ensayos 4, 6, 8, y 10, de fechas 13, 20, 22 y 28 de agosto, cuyos resultados se muestran en la Figura 9, sus TEH fueron de: 06:43:20, 06:59:30, 08:08:30, 06:44:30 horas respectivamente. En los incisos A, C, E y G se muestra el comportamiento de la temperatura desde la media noche, como también se muestra el inicio y el final el ensayo, las IH llegaron a -10; -7,3; -5,3 y -3,7 respectivamente, en cuanto al incremento de temperatura promedio fue de 5; 2,3; 1,2 y 2,4 °C respectivamente. En los inciso B, D, F y H se muestra el comportamiento de la humedad relativa, cuyos valores máximos llegaron a 78; 73; 93 y 75 % respectivamente, el incremento de humedad relativa media fue de 35; 31; 34,4 y 16,3 % respectivamente.

Respecto al comportamiento de la velocidad del viento para el ensayo 4 se presentaron vientos desde 0 a 9 m s⁻¹, para el ensayo 6 se presentaron vientos desde 0 a 12 m s⁻¹, para el ensayo 8 se presentaron vientos desde 0 a 9 m s⁻¹ y finalmente para el ensayo 10 no se presentaron vientos en el periodo de evaluación, aunque inicialmente si, las velocidades de viento llegaron hasta los 18 m s⁻¹, lo que puede ser que facilitó el rápido enfriamiento del ambiente y en adelante se presentó una helada de radiación.

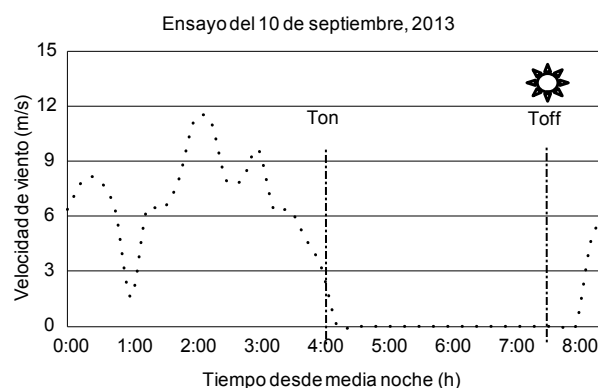


Figura 5. Comportamiento de la velocidad del viento para el ensayo 20 de fecha 10 de septiembre, para un tiempo de exposición de 0 a 3 horas.

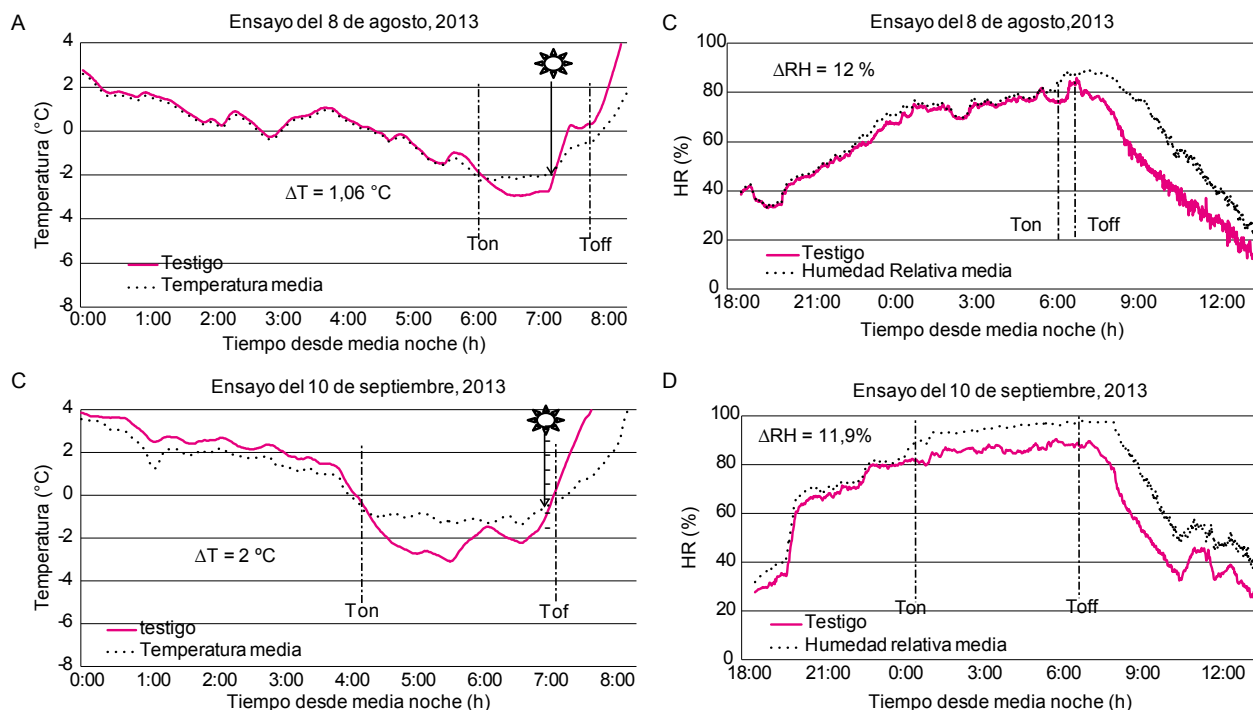


Figura 6. Efecto del riego por aspersión y el control de la temperatura para un tiempo de exposición de 0 a 3 horas. (T_{on}: Encendido del sistema de evaluación y T_{off}: Apagado del sistema de evaluación).

En la Figura 7 se muestra el comportamiento para un TEH mayor a 9 horas, que corresponde a la categoría cuatro (Tabla 3) se han seleccionado los ensayos 5, 9, 12, y 13, de fechas 16/08, 27/08, 02/09 y 03/09, sus TEH fueron de: 09:05:00; 09:52:00; 09:40:00 y 11:40:30 horas respectivamente. En los incisos A, C, E y G se muestra el comportamiento de la temperatura desde la media noche, como también se muestra el inicio y el final del ensayo, las IH de temperatura durante el ensayo llegaron a -7; -5; -8,2 y -6,3 respectivamente, en cuanto al incremento de temperatura promedio, fue de 2; 1,5; 1,1 y 2 °C respectivamente. En los incisos B, D, F y H se muestra el comportamiento de la humedad relativa, cuyos valores máximos llegaron a 75; 92; 73 y 74 % respectivamente, el incremento de humedad relativa media fue de 32; 20; 18 y 25 % respectivamente.

Respecto a la velocidad del viento para los ensayos 5, 9, 12 y 13, donde se puede evidenciar, que en el periodo de evaluación desde el inicio de la helada existieron vientos. Para el ensayo 5 se presentan vientos desde 0 a 12 m s⁻¹, para el ensayo 9 se presentan vientos desde 0 a 5 m s⁻¹, ensayo 12 se presentan vientos de 0 a 5 m s⁻¹ y para el ensayo 13 se presentaron vientos desde 1 a 10 m s⁻¹. Lo que nos indica que se presentaron heladas de advección.

Anconelli et al., (2002), encontraron que a temperaturas de -7 y -8 °C llegan a ganar 3 °C en huertos al aplicar riego por microaspersión, comparando diferentes tipos de microaspersores y niveles de aplicación en huertos, desarrollados en Bologna en Italia. Condori (1999) encontró una ganancia de solo 1,23 °C y de humedad relativa de (ΔRH) 5,26%, estudio donde se comparó tres métodos de protección contra heladas para el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) en el Altiplano Norte de La Paz, en el centro experimental de "Kentupata", cuya intensidad de aplicación fue de 3 mm h⁻¹.

Por otro lado también se puede señalar que existe una relación directamente proporcional de ganancia de temperatura con relación a la ganancia de humedad relativa hasta una temperatura de -5 °C. En los ensayos 4, 5, 6, 8, 12 y 13 fueron en los ensayos donde la temperatura descendió por debajo de -5 °C, se tuvo cuidado en el congelamiento del mecanismo de los aspersores, a pesar de que estos tenían la característica de ser antiheladas, pues llegan a perder movilidad mecánica por debajo de esa temperatura -5°C, ya que el cálculo de la intensidad de riego fue desarrollada para dicha temperatura límite, es así que se debería incrementar la intensidad de helada. Gil (1989) indica que este método llega a proteger hasta una temperatura de -8 °C.

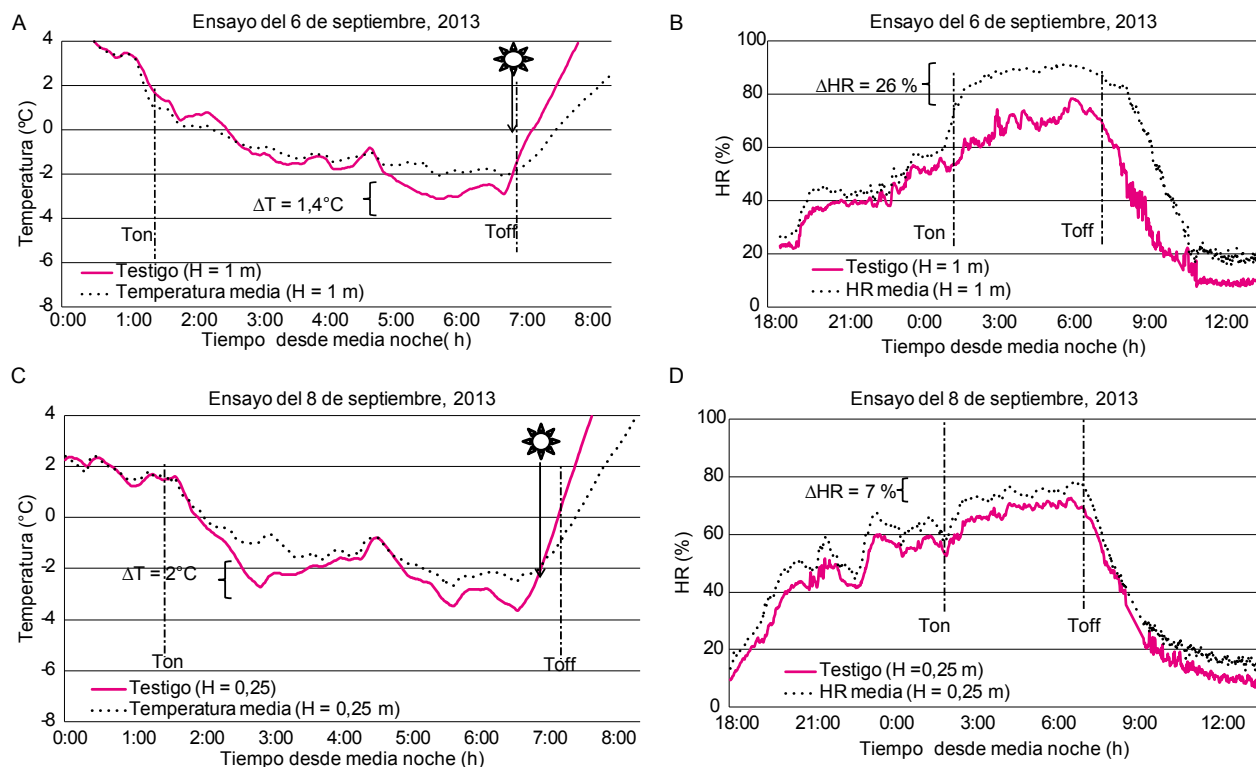


Figura 7. Efecto de riego por aspersión y el control de la temperatura para un tiempo de exposición de 3 a 6 horas.

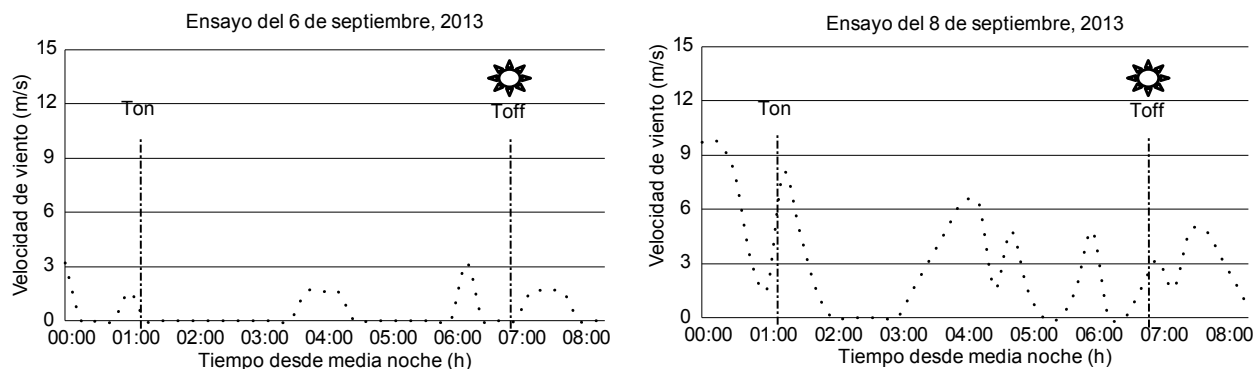
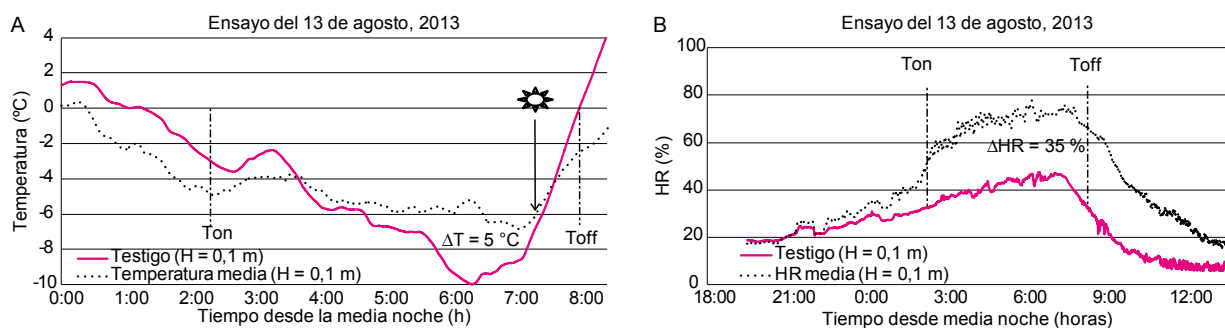


Figura 8. Comportamiento de la velocidad del viento para los ensayos: 16 de fecha 6 de septiembre y ensayo 18 para el 8 de septiembre, para un tiempo de exposición de 3 a 6 horas.



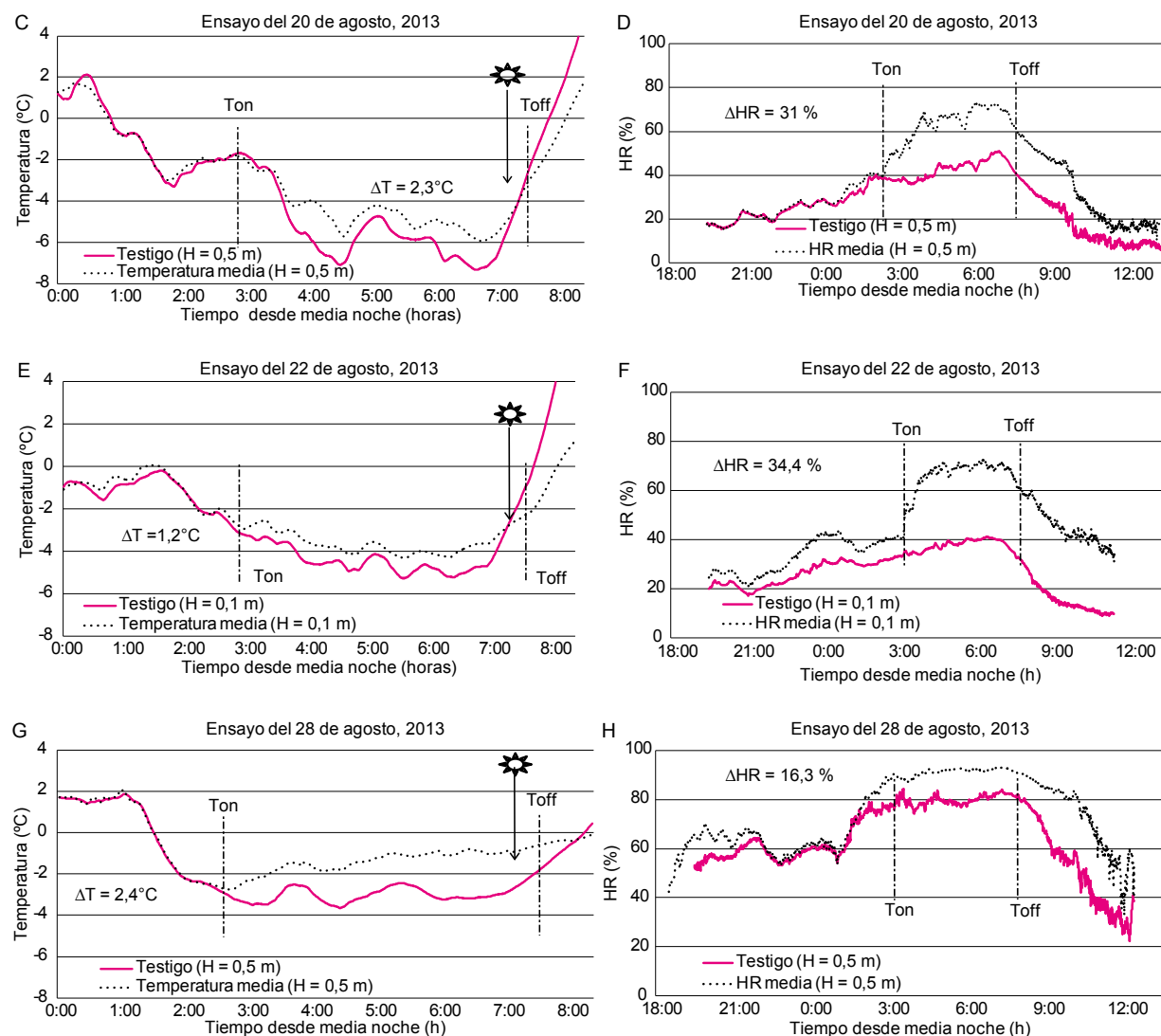


Figura 9. Efecto del riego por aspersión y el control de la temperatura para un tiempo de exposición de 6 a 9 horas. (Ton: Encendido del sistema de evaluación y Toff: Apagado del sistema de evaluación)

Temperatura y humedad relativa debida al efecto de riego por aspersión (ERA) y debida al efecto de suelo húmedo (ESH)

Efecto de riego por aspersión (ERA)

El tipo de heladas presentes en el estudio fueron heladas de radiación, advección y mixtas. Las IH que se presentaron en los ensayos fueron desde -1 a -10°C ; las máximas humedades relativas alcanzadas (ΔHR_{max}) fueron de 73 a 93 %; los TEH a los que estuvieron sometidos variaron desde 45 minutos hasta 11 horas y 40 minutos; los vientos que se presentaron tuvieron velocidades que van desde 0 a 12 m s^{-1} .

El incremento de temperatura (ΔT_{era}) para todos los ensayos realizados ERA, van desde 1 a 5°C y respecto a la ganancia de humedad relativa (ΔHR_{era}) estas van desde 7 a 35% (Tabla 3). Estudios realizados en Bolivia por Condori (1999) han encontrado una reducción de $1,23^{\circ}\text{C}$ ΔHR de 5,26 %. Gil (1989), señala que se puede asegurar una protección de hasta -6°C en frutales, a esto Snyder et al., (2010) indica que su protección puede ser incluso en heladas de advección hasta cerca de -7°C si las tasas de aplicación son suficientes y la aplicación es uniforme.

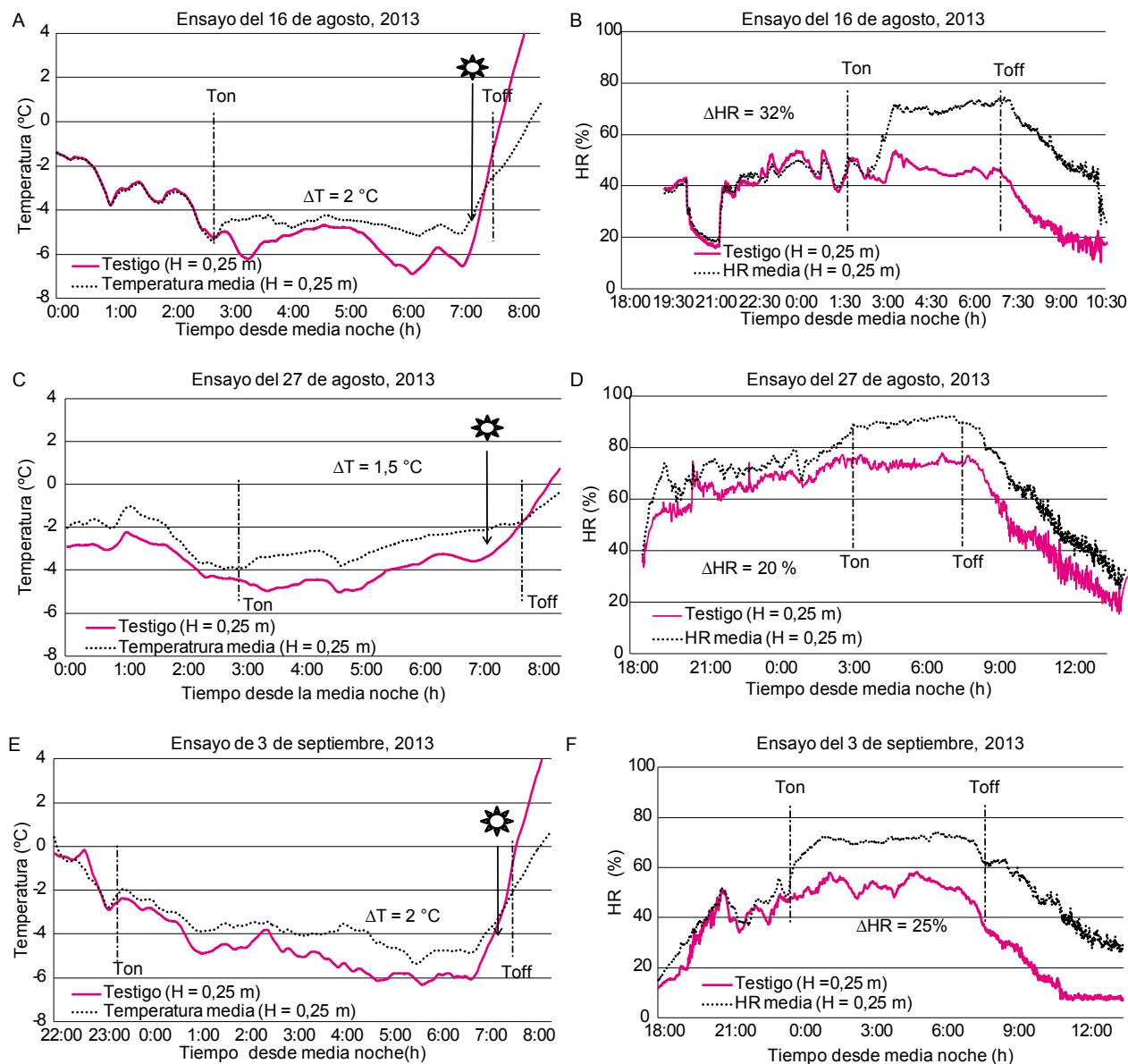


Figura 10. Efecto de riego por aspersión y el control de la temperatura a un tiempo de exposición mayor a 9 horas. (Ton: Encendido del sistema de evaluación y Toff: Apagado del sistema de evaluación).

Efecto debido a suelo húmedo (ESH)

En la Figura 11 incisos A, C y E se muestra el incremento de temperatura media, estos incrementos de temperatura son de 1,1; 0,8 y 0,5 °C para los ensayos 12, 15 y 16 respectivamente. Por lo que se puede indicar que el incremento de temperatura media debido al ESH fue de alrededor de 1 °C. En cuanto al incremento promedio de la humedad relativa fue de: 18; 14,6 y 12 % para los ensayos 12, 15 y 16 respectivamente. Por lo que también se puede indicar que el incremento promedio de la humedad relativa es de alrededor de 15 % (Figura 11 incisos B, D y F). Jones (1924), Cunha (1952), Diaz-queralto (1971) y Snyder et al., (2010) indican que

existe una ganancia de temperatura debido al efecto de riego por superficie o al inundar el terreno con el objeto de proteger los cultivos por la helada. Jones (1924) en una de las primeras investigaciones sobre el uso de agua en superficie, encontró un aumento de 1 °C en cítricos, regadas con agua a 23 °C. Sin embargo Businger (1965) en un estudio de riego por inundación llegó a ganar hasta 4 °C indicando que esta depende de la gravedad de la helada, mientras que Georg (1979) llegó a ganar 3 °C para un cultivo de pimentón bajo riego por inundación. En estudios en suka kollus, PROSUKO (1997) llegó a ganar hasta 2 °C, Lozada (1998) logró ganar 1 °C, mientras que Bosque (1994) logró un incremento de 0,3 y 0,5 °C.

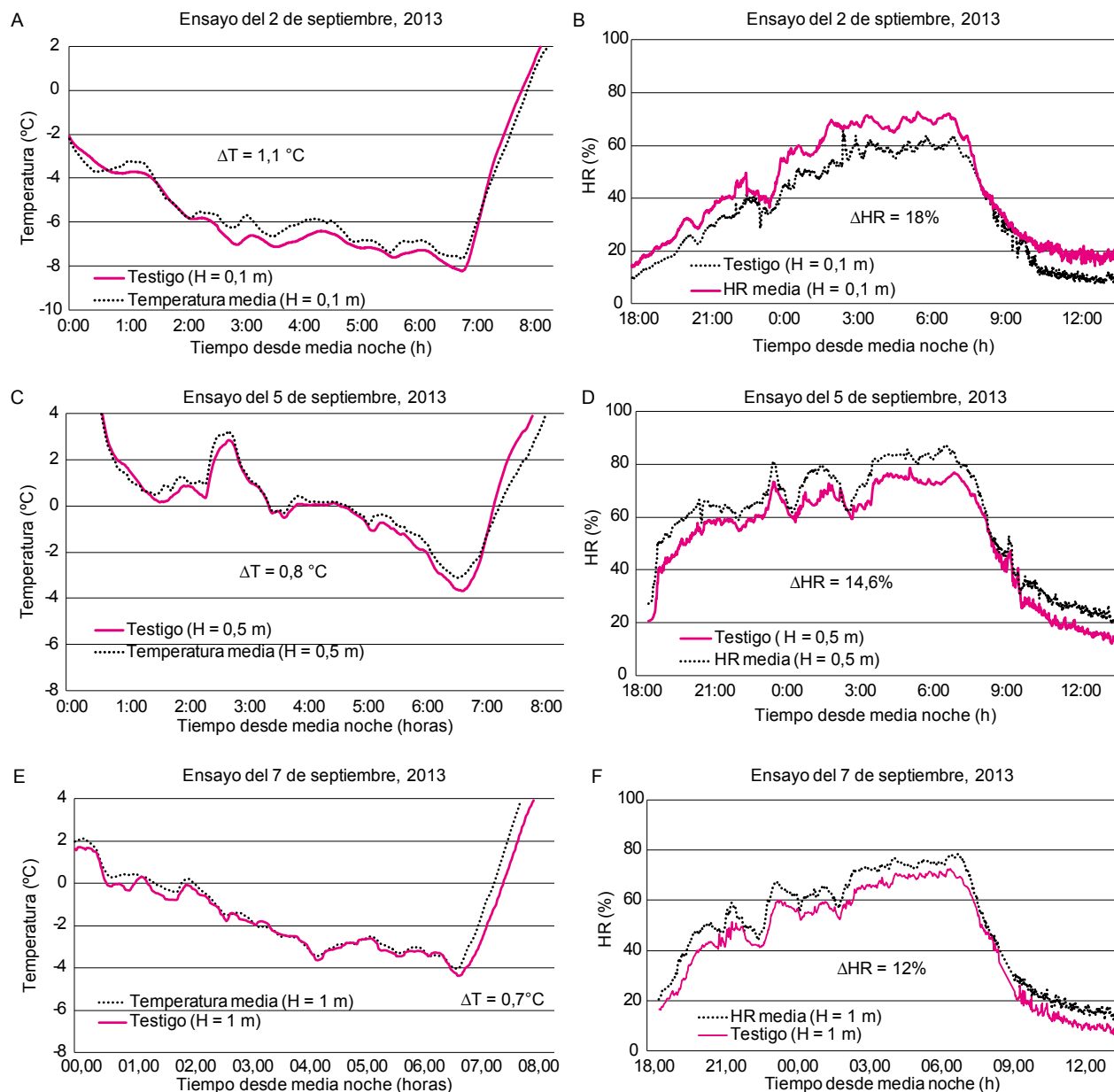


Figura 11. Incremento de temperatura y humedad relativa media para una parcela irrigada un día antes por el método de riego por aspersión.

CONCLUSIONES

Los incrementos de temperaturas (ΔT) según las categorías de TEH variaron de: $1,2^{\circ}\text{C}$ para una TEH de 0 a 3 horas; $1,4$ a 2°C para una TEH de 3 a 6 horas; $1,2$ a 5°C para un TEH de 6 a 9 horas y $1,1$ a 2°C para un TEH mayor a 9 horas. El incremento humedad relativa (ΔHR) según las categorías de TEH variaron, estas fueron de: 12% para una TEH de 0 a 3 horas; 7 a 26% para una TEH de 3 a 6 horas; 16 a 35% para un TEH de 6 a 9 horas y 18 a 32% para un TEH mayor a 9 horas. A menores tiempos de exposición de heladas (TEH), categoría 1 (0 a 3 horas) los vientos fueron

nulos, en los que se presentó solo heladas de radiación. A mayores tiempos de exposición de heladas (TEH) de las categorías 2, 3 y 4 (3 a 6 horas, 6 a 9 horas y mayores a 9 horas) se presentaron vientos que alcanzaron hasta 12 m s^{-1} , por lo que se puede indicar la presencia de heladas advectivas y radiación. Se presenta una tendencia directamente proporcional al incremento de temperatura (ΔT) con relación al incremento de humedad relativa (ΔHR). El incremento de temperatura debido al efecto de una parcela irrigada un día antes (ΔT_{esh}) se encuentra en el rango de $0,7$ a $1,1^{\circ}\text{C}$ y respecto a la ganancia de humedad relativa (ΔHR_{esh}) esta fue de 12 a 18% .

Finalmente para un I_p de 5 mm h^{-1} , el volumen necesario para un TEH de 6 horas (Tabla 2 y 3), para una hectárea precisamos un volumen de 300 m^3 por día, a un caudal de 5 $lts\ s^{-1}$, con este caudal es posible regar aproximadamente de 5 a 10 ha de un cultivo mediante riego por goteo también por un día, por otro lado si la I_p se duplicara a 10 mm h^{-1} como en el presente estudio el caudal posible a regar por riego por goteo tendría que ser en la misma proporción. De allí que técnicamente en el Altiplano debido a la escasez del agua no es recomendable desde ese punto de vista, la protección por este método.

BIBLIOGRAFÍA

- Anconelli, S., Facini, O., Marletto, V., Pitacco, A., Rossi, F., Zinoni, F.** 2002. Micrometeorological test of microsprinklers for frost protection of fruit orchards in Northern Italy. Physics and Chemistry of the Earth. ELSEVIER. Italia. 1103-1107 p.
- Angus, D. E.** 1955. The use of heaters for frost prevention in a pineapple plantation. Australian Journal of Agricultural Research, Australia, 186-195p.
- Barfield, B. J., Perry, K. B., Martsof, J. D., Morrow, C. T.** 1990. Modifying the aerial environment. In: Hoffman G J, Howel T A, Solomon K H, eds, Management of farm irrigation systems (Chapter 22). ASAE. St. Joseph, MI. USA 827-867 p.
- Bettencourt, M. L.** 1980. Contribuição para o estudo das geadas em Portugal Continental. In: O Clima de Portugal, Fasc. XX. Lisboa: I.N.M.G. Lisboa-Portugal 80 p.
- Blanc, M. L., Geslin, H., Holzberg, I. A. y Mason, B.** 1963. Protection against frost damage. WMO, Technical Note, No. 51. Geneva-Switzerland. 62p.
- Bosque, S. H.** 1994. Cultivo en suka kollu de quinuas tolerantes a heladas en dos épocas de siembra. Tesis de Licenciatura Facultad de Agronomía. UMSA La Paz-Bolivia 140 p.
- Brooks, F. A.** 1961. Frost Control. Agricultural Engineers Handbook. McGraw-Hill. Inc., New York-USA 532-534 p.
- Businger, J. A.** 1965. Frost protection with irrigation. agricultural meteorology. Boston, Mass.: American Meteorological Society USA 368-371p.
- Calderón, E.** 1989. Fruticultura general. 3ra edición. Edit. Limusa. México. 760 p.
- Campbell, G. S. y Norman, J. M.** (1998). An introduction to environmental biophysics. Springer-Verlag. New York-USA. 286p.
- Condori, M. D.** 1999. Evaluación microclimática de tres métodos de protección contra heladas en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Altiplano Norte. Tesis de Licenciatura Facultad de Agronomía. Ingeniería en Agronomía UMSA La Paz, Bolivia 110 p.
- Cordy, C. B.** 1965. Frost protection in pear orchards with overcrop sprinklers. Special Report 196, Oregon State University. Corvallis USA. 110 p.
- Cunha, F. R.** 1982. Problema da geada negra no Algarve INIA Divulgação No. 12. Lisboa-Portugal. 125p.
- Cunha, J. M.** 1952. Contribuição para o estudo do problema das geadas em Portugal. Relatório final do Curso de Engenheiro Agrônomo. I.S.A., Lisboa Portugal 80 p.
- Davies, F., Jackson, L., Rippetoe, L.,** (1984). Low volume irrigation and tree wraps for cold protection of young halmin orange trees. Proceeding of the Florida State Horticultural Society. Florida, USA. 25-27 p.
- Díaz - Queralto, F.** (1971) Práctica de la defenza contra la heladas. Edición Dilagro. Lérida - España 384 p.
- Goodhal G., Angus D., Leonard A., Brooks F.** (1957) Effectiveness of wind machines. California Agriculture, California USA. 7-9 p.
- Georg, J. G.** 1979. Frost protection by flood irrigation. In: Barfield and Gerber, USA. 368-371 p.
- Gerber, J. F. Harrison, D. S.** 1964. Sprinkler irrigation for cold protection of citrus. Transactions of the ASAE, 7, USA 464-468 p.
- Gerber, J. F., Martsof, J. D.** 1979. Sprinkler irrigation for frost and cold protection. In: Modification of arial environment of crops. American Society of Agricultural Engineering (ASAE), St Joseph, Michigan. USA. 327-333 p.
- Gil, A.** 1989. Ecología del árbol frutal. Vol. II Edit. Mundi-Prensa Madrid, España 217 p.
- Goodhal, G., Angus, D., Leonard, A., Brooks, F.** 1957. Effectiveness of wind machines. California Agriculture. California, USA. 7-9 p.

- Jones, E. H.** 1924. Irrigation, a frost protection in the citrus grove. *Californian Citrographer*, 9: California-USA. 249 p.
- Martsof, Jd.** 1974. Practical frost protection. *Penn. Fruit News University of Florida*, 53(5): Florida-USA 15-30 p.
- Martsof, J. D. y Jackson, J. L.** 1985. Cold protection guide. Revision 2. Agricultural service extension, Institute and food and agricultural science, University of Florida, Gainesville, Florida-USA 219-240 p.
- Mota, F. S.** 1981. *Meteorología Agrícola*. 5th ed. São Paulo-Brazil 80p.
- Perry, K. B.** 1979. Evaluation and refinement of sprinkler application rate models used in frost protection. Ph D dissertation. Pennsylvania State University, University Park. Pennsylvania-USA. 204 p.
- Perry, K. B., Martsof, J. D., Morrow, C. T.** 1980. Conserving water in sprinkling for frost protection by intermittent application. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* USA 105(5):657-660 p.
- Perry, K. B., Morrow, C. T., Jarrett, A. R., Martsof, J.D.** 1982. Evaluation of sprinkler application rate models used in frost protection with a note on a distribution factor. *HortScience*. USA 17(6):884-885 p.
- Perry, K. B.** (1986). FROSTPRO, a microcomputer program to determine overhead irrigation rates for frost/freeze protection of apple orchards. *HortScience*. Pennsylvania-USA. 21(4):1060-1061 p.
- Prosuco** (1997) Informe microclimático Gestión 96/97 La Paz - Bolivia 50 p.
- Ramírez, M. L., Fuentes, M. O., García, J. F.** 2001. *Heladas*, 1ra ed. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México 39 p.
- Snyder, R., Melo-Abreu, J., Villar-Mir, J.** 2010. *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*. 1er. Volumen. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. Roma-Italia. 257 p.
- Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR).** 2013. *Inventario Nacional de Sistemas de Riego 2012*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Cochabamba-Bolivia. 38 p.