

DISEÑO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN INVERNADERO ANDINO ESCOLAR EN ESTACIÓN SALAR DE POCITOS, PROVINCIA DE SALTA

Sofía Avalos Ambroggio¹, Sebastián Miguel¹

¹Instituto de Sustentabilidad Energética y Diseño Bioambiental. Universidad Católica de Salta.

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Salta, Argentina.

e-mail: sofia.avalos@unc.edu.ar, samiguel@ucasal.edu.ar

RESUMEN: Se plantea el diseño y simulación del comportamiento térmico de un invernadero andino para producción de alimentos ubicado en la Escuela Pública “7 de Mayo” en Estación Salar de Pocitos, Provincia de Salta, Argentina. El objetivo propuesto es evaluar el desempeño del invernadero diseñado durante las 4 estaciones del año utilizando SIMEDIF 2.0 para simular las temperaturas interiores. Se incluyen mejoras en el diseño: aberturas y rejillas de ventilación con posibilidad de cierre, y muros acumuladores tipo trombe en la fachada norte, evaluando aportes de calor de dos alternativas: muro con cámara de aire y vidrio simple y muro con cámara de aire y DVH. Los resultados que se obtienen son contrastados con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos. Se puede evidenciar un comportamiento favorable durante los meses de otoño y primavera. En los meses de invierno, ante condiciones extremas bajo cero, la temperatura interior logra mantenerse por sobre la *temperatura letal* para cultivos. En los meses de verano se requiere ventilación natural para reducir las máximas temperaturas alcanzadas y lograr así las temperaturas recomendadas.

Palabras clave: invernadero, tecnología, simulación, transferencia.

INTRODUCCIÓN

En la región de la Puna Argentina, las condiciones adversas del clima (bajas temperaturas, gran amplitud térmica diaria y estacional, y presencia de fuertes vientos) como así también las características particulares de los suelos, hacen que la producción de cultivos sea posible solo bajo recintos cerrados. Esto ha llevado a proponer técnicas constructivas de invernaderos adaptados a los territorios de la región fría y al paisaje del altiplano. Asimismo, las condiciones de radiación solar son muy favorables para su aprovechamiento en el desarrollo de cultivos bajo techo.

Se han llevado a cabo numerosas experiencias de diseño, construcción y evaluación del desempeño de invernaderos en la región (Quiroga et. al. 1998; Quiroga et. al. 1999; Echazú et al., 2004; Quiroga et al., 2005 entre otros), identificando dificultades para mantener la temperatura nocturna en niveles adecuados para los cultivos debido a infiltraciones excesivas, aislaciones térmicas insuficientes y poca acumulación de calor. A su vez, se presentan problemas de exceso de temperatura interior causado por la escasa ventilación y baja remoción de la humedad.

En busca de continuar optimizando el funcionamiento de los invernaderos andinos en todos los aspectos mencionados, se diseñó un prototipo para la Escuela Pública “7 de Mayo” de Estación Salar de Pocitos, departamento Los Andes, Salta. El mismo tendrá una función educativa, en la transferencia de prácticas habituales sobre cultivos bajo invernaderos. Al mismo tiempo, producirá alimentos para consumo en el comedor de la escuela. El diseño fue llevado a cabo por investigadores y proyectistas del ISEDIB (Instituto de Sustentabilidad Energética y Diseño Bioambiental-UCASAL) mediante un convenio de financiamiento con la Fundación Condor, a través de talleres participativos con habitantes del lugar, considerando experiencias previas.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del invernadero proyectado en las 4 estaciones del año mediante simulación térmica, comparando la temperatura interior alcanzada con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos por el INTA (Lenschak e Iglesias, 2019).

Además, se propone realizar la evaluación de la inclusión de mejoras, incorporando muros acumuladores del calor (muros trombe) en la fachada norte, tanto con vidrio simple, como con DHV, para determinar si los muros acumuladores pueden colaborar en aumentar la temperatura interior.

ANTECEDENTES

Desde la década de 1980 los invernaderos se constituyen en un elemento importante para cultivar hortalizas para autoconsumo a lo largo del territorio del altiplano. Se han construido innumerables modelos y diseños de invernaderos, reproducidos por generaciones con saberes adquiridos y técnicas constructivas propias de la región. Organismos como el INTA y diferentes ONG's como OCLAVE han promovido la construcción de pequeños invernaderos para uso familiar, diseñados para resistir fuertes vientos y bajas temperaturas, que permiten el extender el cultivo de verduras y hortalizas durante todo el año.

El modelo que se introdujo inicialmente fue el de cubierta abovedada, también conocido como “modelo andino” o “de altura”, que consta de un recinto semienterrado con muros de abobe y cubierta parabólica de polietileno. Este modelo es el más difundido, de construcción muy sencilla y costo moderado, pero muy limitado en cuanto a la regulación térmica (Echazú et al., 2004). Se han construido también invernaderos del tipo boliviano, llamados *Walipinis* y *Panqar Huyu* (Iturry, 2002) de mejor funcionamiento térmico debido a su emplazamiento semienterrado (Quiroga et al. 1999).

El éxito de las experiencias de pequeños invernaderos familiares derivó en la construcción de invernaderos en escuelas albergues, para cultivo de hortalizas para consumo del comedor y para prácticas agrícolas de los alumnos (Combetto, Benedetti, y Pelicano, 2000). En particular, el INENCO (Instituto de Investigación de Energía No Convencional, UNSa-CONICET) diseñó y estudió modelos de invernaderos basados en el diseño andino incluyendo mejoras en las técnicas constructivas tradicionales: materiales, forma del techo, aislaciones, ventilaciones y sistema de acumulación térmica (Belmonte et al., 2016).

Se puede mencionar el prototipo de invernadero instalado en el año 1998 con diseño andino mejorado en la localidad de Nazareno, Salta, que incorporó muros de piedra para aumentar la acumulación térmica, y el uso de una *cámara oscura* próxima a la zona de cultivos como lugar de preparación del compost orgánico para abono de la huerta (Quiroga et al., 1998). También el invernadero en Abra Pampa – Jujuy (1999), realizado mediante una experiencia conjunta entre INENCO y OCLADE, destinado al cultivo de flores en pequeña escala, en donde se introdujeron mejoras reduciendo la superficie de sombreado a la mitad, agregando ventanillas de ventilación y colocando doble techo para reducir pérdidas en invierno (Quiroga y Echazú, 1999; 2016). El prototipo instalado en 2003-2004 para la producción de hortalizas para el comedor de la Escuela albergue N° 4526 de El Rosal (Echazú et al., 2004; Quiroga et al., 2005) incorpora además 8 registros con un sistema de llaves de dos vías de control manual para regular la circulación de aire entre el invernadero y el exterior, y el invernadero y la cámara oscura. El mismo ha funcionado durante años con cultivos principalmente hortícolas (Quiroga et al., 2016). Finalmente, el invernadero de El Alisal, en el que la cámara oscura fue reemplazada por un recinto destinado a salón comunitario de actividades múltiples (Quiroga y Echazú, 2016).

Otras experiencias monitoreadas en zonas altoandinas de Perú señalaron la necesidad de incorporar en la cubierta elementos traslúcidos de máxima transparencia a la radiación solar de onda corta que llega durante el día (Zanabria, 2015). A su vez, estos elementos deben tener una opacidad considerable al paso de la radiación infrarroja de onda larga emitida por el suelo, plantas y muros, para que el calor acumulado no se pierda hacia el exterior durante la noche (Álvarez Díaz et al., 2022).

Las experiencias citadas anteriormente en la Puna Argentina demuestran que muchas veces, el paso de la radiación solar de onda corta a través de la cubierta transparente provoca un aumento excesivo de la temperatura dentro del invernadero (Abdo et al, 2005).

La falta de ventilación durante las horas de mayor radiación solar provoca altas temperaturas en el interior de los invernaderos, lo que conlleva a un daño y marchitamiento de los cultivos (Echazú et al., 2004). Además, la escasa ventilación relacionada con la baja remoción de la humedad ambiente del recinto provoca graves problemas sanitarios en las plantas, por proliferación de hongos y una

contaminación progresiva del suelo. Esto lleva a una disminución en la producción de cultivos (Echazú et al., 2004).

TEMPERATURA RECOMENDADA

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y el crecimiento y desarrollo de las plantas. “En invernaderos no automatizados es difícil lograr mantener los valores de temperatura dentro de los rangos óptimos para cada cultivo, por lo cual los procesos de crecimiento pueden ralentizarse y comprometer los niveles y calidad de la producción” (Lenschak e Iglesias, 2019, pág. 17). Los valores de temperaturas óptimas interiores (tanto diurnas como nocturnas) requeridos para la producción vegetal propuestos por el INTA (Lenschak e Iglesias, 2019) se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para diferentes cultivos.

Especie	Temperatura óptima nocturna (°C)	Temperatura óptima diurna (°C)	Temperatura mínima letal (°C)
Tomate	13 °C – 16°C	22°C – 26°C	0 °C – 2°C
Calabaza	15 °C – 18°C	24°C – 30°C	0 °C – 4°C
Chauca	16 °C – 18°C	21°C – 28°C	0 °C – 2°C
Pimiento	16 °C – 18°C	22°C – 28°C	0 °C – 4°C
Lechuga	10 °C – 15°C	15°C – 20°C	0 °C – 2°C

Además, Martínez y Roca (2011) incluyen *la temperatura mínima letal* para cultivos. Esta se refiere al “umbral por debajo del cual la planta puede sufrir daños irreversibles” (Martínez y Roca, 2001, pág. 184). Los valores presentados serán tenidos en cuenta en la evaluación del desempeño térmico del prototipo de invernadero propuesto en el presente trabajo.

DISEÑO DEL INVERNADERO

El diseño está basado en los modelos de invernaderos existentes en la región andina. Consta de dos espacios interiores: el área de cultivo, orientada al norte, con una superficie total de 55.00 m², y una cámara de convección, llamada cámara oscura en los estudios citados anteriormente, orientada al sur, de 11.00 m².

El área de cultivo esta semienterrada en dos niveles de terraza, uno a un nivel de -0.18m y otro a -0.36m de profundidad. Los muros exteriores son de adobe, de 40 cm de espesor, apoyados sobre un basamento de piedra. Sobre el muro exterior norte se ubican muros acumuladores de calor (muros trombe) estancos para captar energía calórica y luego entregarla al ambiente en horas de la tarde/noche por efecto de radiación. (Fig.1)

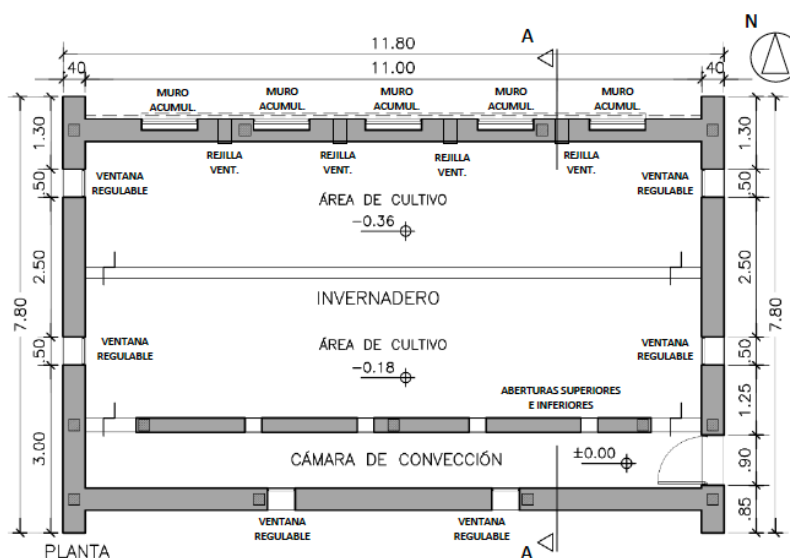


Figura 1. Planta del Invernadero proyectado

La cámara de convección contribuye a atenuar la amplitud térmica. Por un lado, se utiliza para proteger el área de cultivos en la orientación más fría (sur). Por otro lado, para generar movimientos convectivos de aire en el interior, contribuyendo a atenuar la amplitud térmica. Esto se realiza por medio de perforaciones altas y bajas que se practican en el muro divisorio interno, también realizado de adobe, con un espesor de 20 cm. (Fig.2)

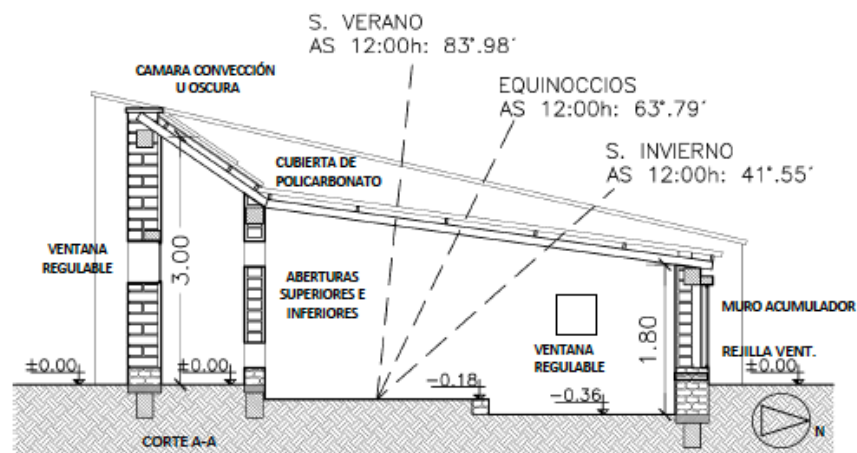


Figura 2. Corte A-A del Invernadero proyectado.

En las fachadas este, oeste y sur se ubican pequeñas aberturas de aluminio con vidrio simple, para ventilar el ambiente del invernadero cuando las temperaturas sobrepasen las máximas recomendadas, ya sea en épocas estivales o durante las horas de la tarde. Asimismo, se incorporan una serie de rejillas de ventilación móvil con posibilidad de cierre en la parte baja del muro norte para mejorar la ventilación y regular el exceso de calor que pudiera tener el interior del invernadero en los meses de verano.

La cubierta es una estructura metálica de perfiles y caños de hierro. En la zona del invernadero tiene una chapa de policarbonato transparente, mientras que sobre la cámara de convección se coloca una chapa acanalada opaca, con aislación donde también se dispone un sistema de producción de energía eléctrica para el consumo de la escuela a través de energía solar fotovoltaica. (Fig.3 y 4)

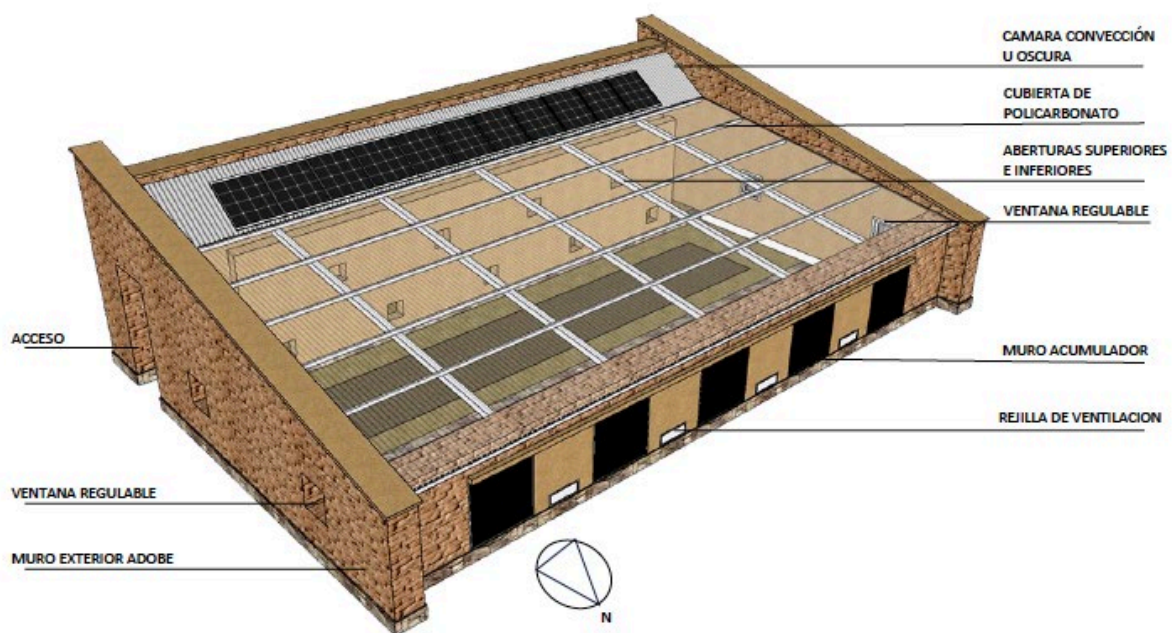


Figura 3. Axonometría del Invernadero proyectado.

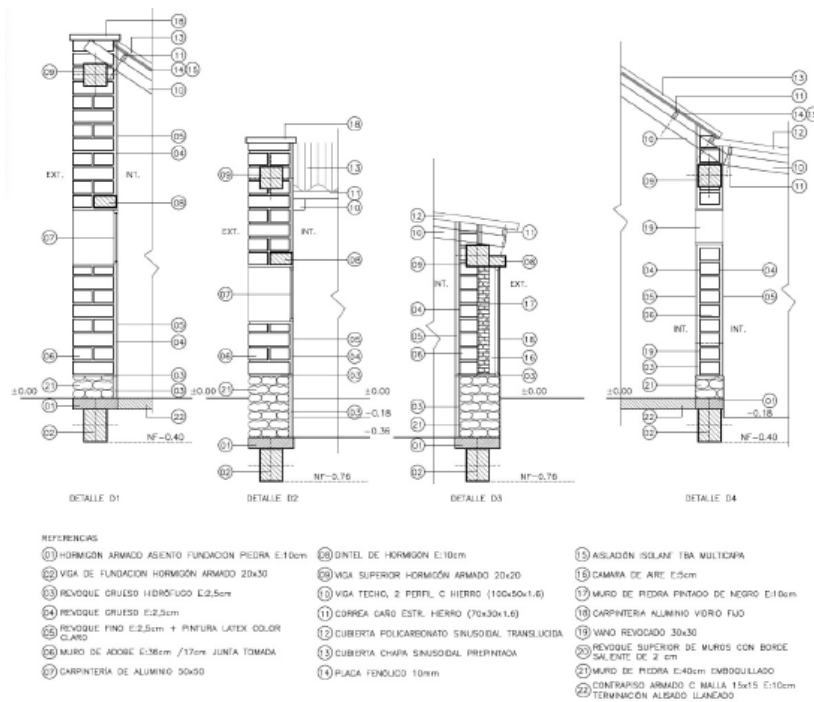


Figura 4. Detalles constructivos del Invernadero proyectado.

METODOLOGÍA

El comportamiento térmico del invernadero fue simulado utilizando el software SIMEDIF 2.0 para Windows (Flores Larsen, 2019; 2020). Este software se utiliza para realizar las simulaciones térmicas de edificios con acondicionamiento natural a través de sistemas solares pasivos. Para realizar las simulaciones se utilizó un archivo climático TMY extraído del software Meteororm 8, de extensión epw.

Se establecieron 3 zonas térmicas interiores: 1) invernadero (área de cultivo), 2) cámara de convección y 3) cámara de aire del muro acumulador, entre el revestimiento de piedra y la carpintería de vidrio fijo. Las características de las envolventes opacas se describen en la Tabla 2, y las características de envolventes transparentes se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Descripción de parámetros de envolventes opacas

Envolventes opacas	Tipo	Orientación	Sup. (m ²)	Lado Int.		Lado Ext.		Sup. Asoleada	
				Abs.	C.C.	Abs.	C.C.	Exterior	Interior
Invernadero									
M1 (Exterior)	Masiva	V- Norte 180°	14.80	0.3	6	0.3	12	14.80	0.00
M8 (M. Acum.)	Masiva	V- Norte 180°	5.00	0.3	8	0.9	6	5.00	0.00
M3 (Exterior)	Masiva	V- Este 90°	12.36	0.3	8	0.3	12	12.36	8.70 (***)
M2 (Exterior)	Masiva	V- Oeste 270°	12.36	0.3	8	0.3	12	12.36	8.70 (***)
M4 (C. conv.)	Masiva	V- Interior	21.33	0.3	8	0.3	6	15.00 (*)	0.00
M9 (Piso)	Masiva	H- Interior	56.10	0.3	8	0.3	0.01	0.00	33.00 (**)
Cámara de convección									
M5 (Exterior)	Masiva	V- Oeste 270°	3.09	0.3	6	0.3	12	3.09	0.00
M6 (Exterior)	Masiva	V- Este 90°	1.29	0.3	6	0.3	12	1.29	0.00
N3 (Puerta)	Tabique	V- Este 90°	1.80	0.5	6	0.5	12	1.8	0.00
M7 (Exterior)	Masiva	V- Sur 0°	34.73	0.3	6	0.3	12	34.73	0.00
M10 (Piso)	Masiva	H- Interior	34.00	0.3	6	0.3	0.01	0.00	0.00
N2 (Techo)	Tabique	34°-	12.10	0.2	6	0.2	12	12.10	0.00

C.C.: Coeficiente convectivo radiativo / Abs: Absortancia solar
 (*) Se considera que un 70% de la superficie del muro recibe sol a través del policarbonato de techo.
 (**) Se considera que un 60% de la superficie de piso recibe sol a través del policarbonato de techo.
 (***) Se considera que un 70% de la superficie de muro recibe sol a través del policarbonato de techo.

Tabla 3. Descripción de parámetros de envolventes transparentes.

Envolventes transparentes	Nº vidrios	Orient.	Sup. (m ²)	Coef. U	Material	Sup. recibe radiación
				(Wm ⁻² K)		
V1 (Invernadero)	1	V- Este 90°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V2 (Invernadero)	1	V- Este 90°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V3 (Invernadero)	1	V- Oeste 270°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V4 (Invernadero)	1	V- Oeste 270°	0.25	5.82	Vidrio común	M9-Lad1 Piso
V5 (C. convección)	1	V- Sur 0°	0.25	5.82	Vidrio común	M4-Lad2 Muro
V6 (C. convección)	1	V- Sur 0°	0.25	5.82	Vidrio común	M4-Lad2 Muro
V7 (M.)	1	V- Norte 90°	5.00	5.82	Vidrio común	M8-Lad2 Muro
V8 (Techo)	1	4°-Techo 180°	30.00	3.60	Policarbonato	M9-Lad1 Piso
V9 (Techo)	1	4°-Techo 180°	10.00	3.60	Policarbonato	M4-Lad1 Muro
V10 (Techo)	1	4°-Techo 180°	8.70	3.60	Policarbonato	M2-Lad1 Muro
V11 (Techo)	1	4°-Techo 180°	8.70	3.60	Policarbonato	M3-Lad1 Muro

La variable de interés es la temperatura (°C), por lo que se simularon datos de temperaturas máximas, mínimas, medias, y máximas medias y mínimas medias tanto exteriores como interiores. Se realizaron simulaciones mensuales durante las 4 estaciones del año, en abril, junio, septiembre y diciembre. En el presente artículo se presentan los 4 días considerados representativos de cada mes. Se incluye también un estudio del comportamiento del invernadero durante los 4 días más fríos del año (mes de junio). Además, se simuló durante el mes de diciembre, la incorporación de ventilación al interior del invernadero. Se adoptó como supuesto una ventilación de 15r/h durante la mañana y las primeras horas de la tarde, entre las 8:00h y las 16:00 h.

Una vez realizadas las simulaciones, se comparan resultados con las temperaturas diurnas y nocturnas recomendadas para cultivos presentada en la Tabla 1. En los gráficos de resultados, este rango está marcado con dos franjas de color gris: temperatura diurna recomendada: de 20°C a 30°C (gris claro) y temperatura nocturna recomendada: 15°C a 20° (gris oscuro).

Por último, se evaluó el desempeño de los muros acumuladores en fachada norte. Se realizaron simulaciones durante los meses de referencia, evaluando tres alternativas: la primera con muro acumulador usando una cámara de aire con DVH, la segunda con muro acumulador usando una cámara de aire con vidrio simple y la tercera sin muro acumulador.

RESULTADOS

Mes de abril

La Fig. 5 y Tabla 4 presentan resultados de temperatura de 4 días representativos del mes de abril.

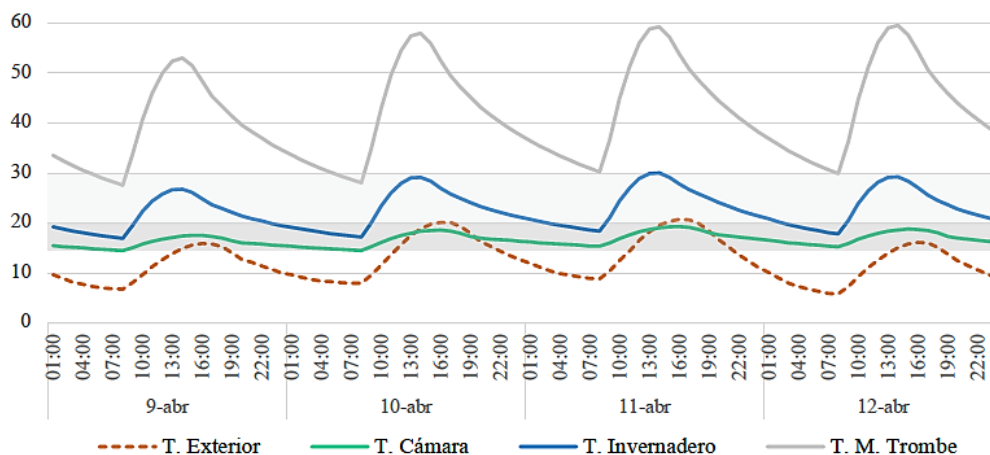


Figura 5. Gráfico de temperaturas del 9 al 12 de abril.

Tabla 4. Temperaturas simuladas para el mes de abril

Abril	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	20.7	-2.6	8.6	13.7	4.1
Invernadero	29.9	11.07	19.7	25.5	15.1
Cámara Convección	19.25	9.43	14.2	15.9	12.6
ΔT T.Inv - T.Exterior	9.2	13.7	11.1	11.8	11.0

Se puede ver que las temperaturas exteriores se encuentran por debajo de las temperaturas recomendadas, tanto durante el día como durante la noche. La máxima media del mes es 13.7°C y la mínima media 4.1°C. La temperatura interior en el invernadero (línea azul de la Fig. 1) se mantiene en el rango de temperaturas recomendadas durante el día y también durante la noche. La máxima media del mes es 25.5°C y la mínima media 15.1°C.

La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 11°C aproximadamente, la cual se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas (alcanzan los 13°C de diferencia entre el exterior y el interior).

Mes de junio

La fig. 6 y Tabla 5 presentan resultados de temperatura de junio. En la Tabla 5 las temperaturas exteriores se encuentran muy debajo de las temperaturas recomendadas. Durante las horas más frías de la noche, llegan a 0°C, es decir, 15°C por debajo de lo recomendado. La máxima media del mes es 11.9°C y la mínima media -1.1°C. La temperatura mínima registrada alcanza los -8°C.

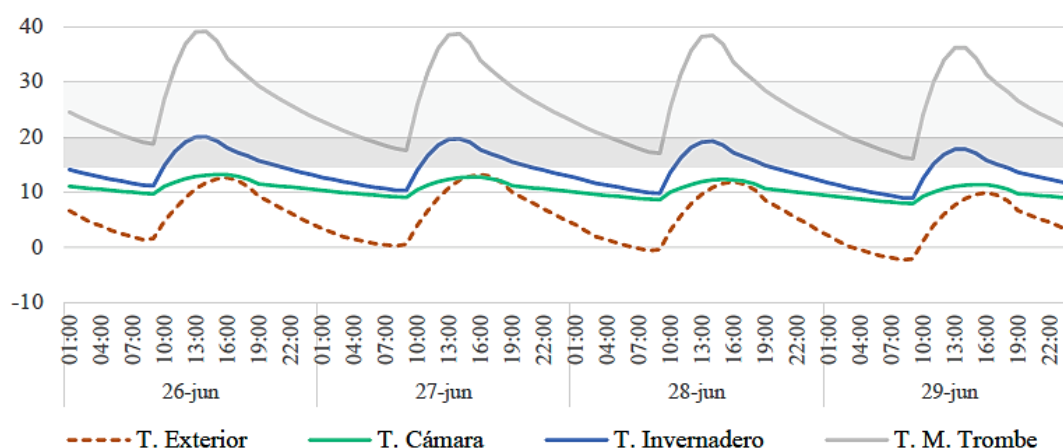


Figura 6. Gráfico de temperaturas del 26 al 29 de junio.

Tabla 5. Temperaturas simuladas para el mes de junio

Junio	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	20.5	-8	4.9	11.9	-1.1
Invernadero	21.6	3.4	12.2	17.6	8.06
Cámara Convección	13.8	2.6	8.3	10.4	6.6
ΔT T.Inv - T.Exterior	1.1	11.4	7.3	5.7	9.2

La temperatura interior en el invernadero alcanza la temperatura nocturna recomendada durante las horas del día, en el horario entre las 10:00 h y las 20:00 h. Durante la noche, las temperaturas caen por debajo de lo sugerido. La máxima media del mes es 17.9°C y la mínima media 8.06°C. La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 5.7°C (en las temperaturas máximas) y 9.2°C (temperaturas mínimas). La diferencia de temperaturas se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas.

En la Fig.7, se representan los 4 días más fríos del año. La temperatura exterior alcanza valores bajo cero todas las noches, llegando a los -8°C . Se pueden ver que las bajas temperaturas son extremas, con heladas durante la noche.

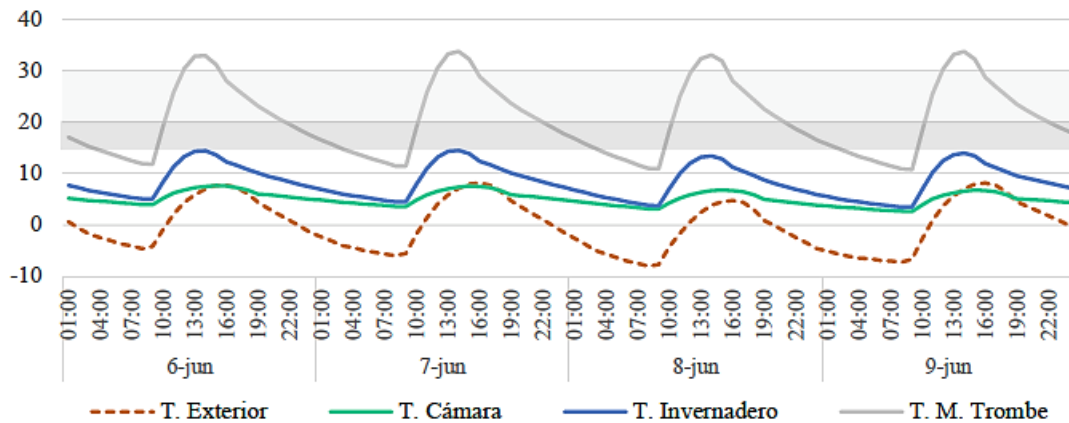


Figura 7. Gráfico de temperaturas más frías del año: 6 al 9 de junio.

Mes de septiembre

La Fig. 8 y Tabla 6 presentan resultados de curvas de temperatura de 4 días representativos del mes de septiembre.

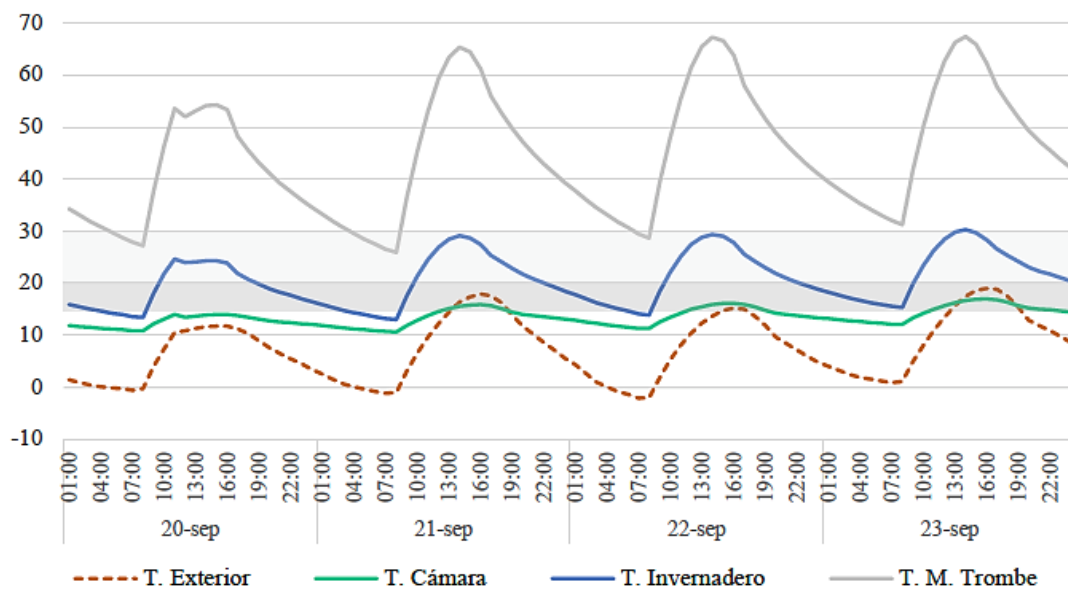


Figura 8. Gráfico de temperaturas del 20 al 23 de septiembre.

Tabla 6. Temperaturas simuladas para el mes de septiembre

Septiembre	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Exterior	25.5	-8.1	7.89	15.7	0.6
Invernadero	32.8	9.9	20.8	27.8	14.9
Cámara Convección	21.6	8.08	14.5	16.6	12.5
ΔT T.Inv - T.Exterior	7.3	18.0	12.9	12.1	14.3

Las temperaturas exteriores siguen por debajo de las temperaturas recomendadas, excepto algunos días en que la máxima diaria alcanza la mínima recomendada (21 y 23 de septiembre). La máxima media del mes es 15.7°C y la mínima media 0.6°C. La temperatura mínima registrada alcanza los -8.1°C. La temperatura interior en el invernadero alcanza la temperatura objetivo durante el día y la mayor parte de la noche. Entre las 2:00 h y las 7:00 h, las temperaturas son ligeramente menores que el mínimo recomendado (12°C). La máxima media del mes es 27.8°C y la mínima media 14.9°C.

La diferencia promedio de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero es de 12.1°C (máximas) y 14.3°C (mínimas). La diferencia se incrementa durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son mínimas.

Mes de diciembre

La fig. 9 y tabla 7 presentan resultados de curvas de temperatura de los 4 días representativos del mes de diciembre. Las temperaturas exteriores alcanzan los valores recomendados durante el día, excepto algunas excepciones de días fríos (24 de diciembre). La máxima media del mes es 17.8°C y la mínima media 5.9°C. La mínima registrada alcanza los 0.4°C y la máxima 25°C.

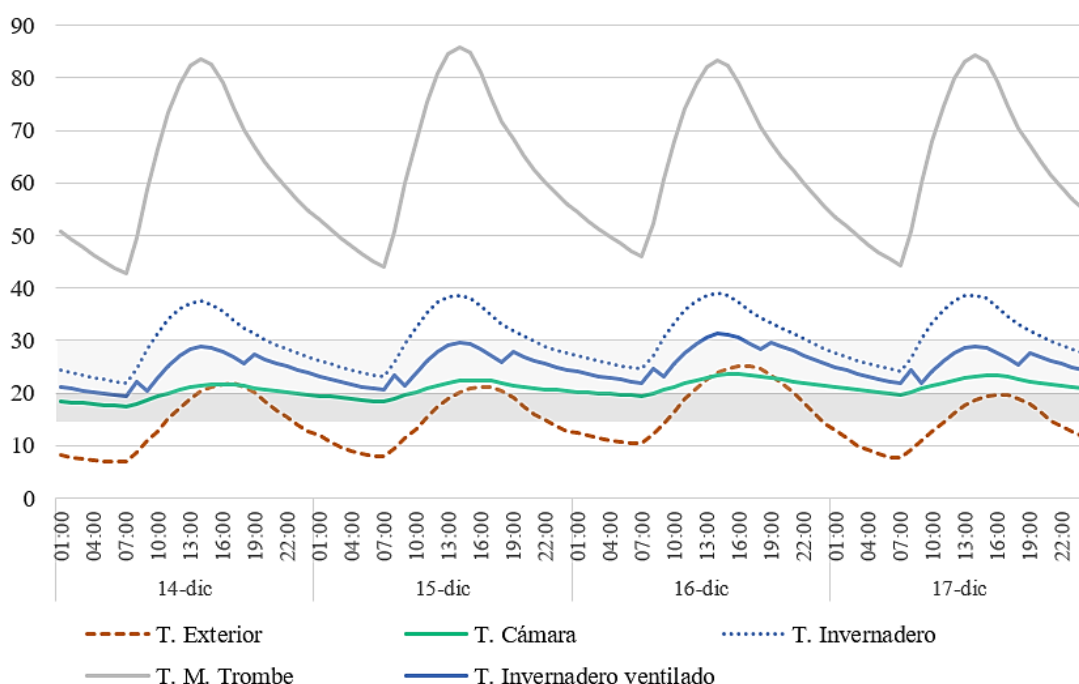


Figura 9. Gráfico de temperaturas del 14 al 17 de diciembre.

Tabla 7. Temperaturas simuladas para el mes de diciembre

Diciembre	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Mín Med.
Exterior	25.1	0.4	11.9	17.8	5.9
Invernadero	39.3	17.3	27.8	35.0	21.5
Invernadero ventilado	31.2	14.7	22.5	26.2	18.6
Cámara Convección	23.8	14.4	19.3	21.0	17.6
ΔT T.Inv – T. Inv ventilado	8.1	2.6	5.3	8.8	2.9
ΔT T.Inv – T.Exterior	6.1	14.3	10.6	8.4	12.7

La temperatura interior en el invernadero sobrepasa valores recomendados durante todo el día (desde las 9:00 h hasta las 20:00h). Durante la noche, entre las 23:00 h y las 9:00 h, las temperaturas entran dentro del rango diurno recomendado (no así en el rango nocturno). La máxima media del mes demuestra un exceso de temperatura (35°C). La máxima registrada alcanza los 39.3°C.

Es necesario incorporar ventilación de ambiente, abriendo las aberturas propuestas para tal fin, con el objetivo de bajar las temperaturas tanto diurnas como nocturnas. Los resultados de temperatura interior del invernadero ventilado entran dentro del rango recomendado, tanto diurna como nocturna. La ventilación reduce 8.8°C en las máximas medias del recinto y 2.9°C en las mínimas medias. La máxima alcanzada muestra una disminución de 39°C a 31°C.

Aporte de calor del muro acumulador

La tabla 8 muestra los resultados de desempeño de los muros acumuladores en fachada norte. En primer lugar, se puede observar que durante los cuatro períodos analizados se produce un incremento de temperatura en la zona térmica invernadero producto del aporte del muro acumulador (tanto con vidrio simple como con DVH).

Analizando resultados de las temperaturas medias, se puede observar que en abril el aporte de calor del muro acumulador con vidrio simple (MA-VS) es de 1.3°C, mientras que aporte del muro acumulador con DVH (MA-DVH) es algo mayor: 2.1°C. Esto se debe a la capacidad del DVH para controlar pérdidas.

En junio la diferencia de temperatura se reduce en ambos casos: a 0.9°C en el caso MA-VS, y 1.8 °C en MA-DVH. Sin embargo, el aporte de calor del caso MA-DVH duplica el aporte de MA-VS.

En septiembre la diferencia se incrementa a 1.4°C en MA-VS y 2°C para MA-DVH, y en diciembre (el mes que registra mayor aporte) la diferencia de temperatura es aproximadamente de 2°C y 2.3°C respectivamente, es decir, el aporte de MA-DVH es levemente mayor.

Tabla 8. Temperaturas simuladas de casos con muro acumulador

Temperaturas mes de abril					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	30.64	11.5	20.5	26.0	16.0
Muro Acum. c/VS (MA VS)	29.9	11.07	19.7	25.5	15.1
Sin Muro Acum. (SMA)	28.5	9.9	18.4	24	13.9
ΔT entre MA VS - SMA	1.4	1.17	1.3	1.5	1.2
ΔT entre MA DVH - SMA	2.1	1.6	2.1	2	2.1
Temperaturas mes de junio					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	22.4	4.4	13.1	18.4	8.9
Muro Acum. c/VS (MA VS)	21.6	3.4	12.2	17.6	8.06
Sin Muro Acum. (SMA)	20.5	2.6	11.3	16.6	7.2
ΔT entre MA VS - SMA	1.1	0.8	0.9	1.0	0.9
ΔT entre MA DVH - SMA	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7
Temperaturas mes de septiembre					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	33.59	10.6	21.5	28.2	15.7
Muro Acum. c/VS (MA VS)	32.8	9.9	20.8	27.8	14.9
Sin Muro Acum. (SMA)	31.3	8.6	19.2	26.5	13.5
ΔT entre MA VS - SMA	1.5	1.3	1.6	1.3	1.4
ΔT entre MA DVH - SMA	2.3	2.0	2.3	1.7	2.2
Temperaturas mes de diciembre					
	T. Máx.	T. Mín.	T. Med.	T. Max Med.	T. Min Med.
Muro Acum. c/DVH (MA DVH)	39.1	17.4	28.1	34.8	22.1
Muro Acum. c/VS (MA VS)	39.3	17.3	27.8	35.0	21.5
Sin Muro Acum. (SMA)	36.9	15.6	25.8	32.9	19.6
ΔT entre MA VS - SMA	2.4	1.7	2	2.1	1.9
ΔT entre MA DVH - SMA	2.2	1.8	2.3	1.9	2.5

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran una vez más que la tecnología de muros de adobe con espesor considerable es recomendable para mantener las condiciones de temperatura deseadas, debido a su masa térmica y su capacidad de acumular calor durante el día para irradiarlo a la noche. Las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior estuvieron cercanas a los 13°C.

Pese a las condiciones climáticas de frío y gran amplitud térmica, durante los meses de otoño y primavera se consiguió mantener condiciones de temperatura diurna y nocturna recomendadas para los cultivos seleccionados. Los meses críticos fueron los meses más fríos y más calientes del año, representados en junio y diciembre.

Durante los 4 días más fríos de junio se registraron temperaturas extremas durante la noche (desde -5°C a -8°C). Se pudo constatar que, pese a que las temperaturas del invernadero no entraron dentro del rango recomendado, no cayeron por debajo de la temperatura letal para cultivos presentada en la tabla 1, manteniéndose en 5°C a 3°C, registrándose una diferencia de 11 a 12°C entre el interior y el exterior. Esto significa que, en condiciones extremas bajo cero y heladas durante toda la noche, los cultivos podrían no presentar daños irreparables.

Esta situación puede, además ser mejorada controlando las pérdidas de calor, que en su mayor parte se producen a través de la cubierta transparente, ya sea planteando otra lámina de policarbonato para aumentar la aislación de cubierta, o incorporando una protección nocturna (por ejemplo, una cortina de tela o media sobra sobre la cubierta) que se use durante las noches del mes de junio.

Por otra parte, durante el mes de diciembre se pudo constatar que, sin una ventilación adecuada, las temperaturas del invernadero sobrepasan el límite recomendado (30°), llegando a los 39°C. La ventilación evidencia disminuciones considerables que alcanzan los 8°C aprox. en las temperaturas máximas y máximas medias del recinto.

Se demuestra que, mediante las mejoras introducidas en el diseño del invernadero (aberturas y rejillas de ventilación) se consigue un buen control de la circulación de aire durante los momentos de mayor temperatura exterior y valores máximos de radiación solar, logrando mantener la temperatura interior de la zona de cultivos dentro de rangos recomendados.

En cuanto a los sistemas de muros acumuladores evaluados (muro acumulador con vidrio simple y con DVH) se concluye que es recomendable utilizar el sistema con vidrio simple. En los meses fríos, cuando se necesita de mayor aporte de temperatura, por más que la diferencia entre ambos sistemas sea el doble, el aumento no es considerable, ya que ronda los 0.9°C a 1.8°C. Sería mejor invertir los sobrecostos asociados a la tecnología DVH en un sistema de protección de pérdidas para la cubierta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Católica de Salta (UCASAL) y a la Fundación Condor por el financiamiento de este proyecto. Además, se agradece al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), en especial al Lic. José Quiñones, por su asesoramiento en el uso de software de simulación.

REFERENCIAS

- Abdo, E., y Szanto, A. (2009). La difusión de Invernaderos de altura con diseño mejorado en Nazareno Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 9*, 10.07-10.12.
- Álvarez Díaz, Mayta Huatuco, Rojas Rojas, Rosales Urbano, Rojas Lazo y Santos De la Cruz (2022). Prototipo de invernadero en zonas alto andinas del Perú para la producción de granos germinados como complemento dietético en la alimentación de camélidos sudamericanos. *Revista Universidad y Sociedad*, 14 (4), 708-717.

- Belmonte, S., Caso, R., Balderrama, B., y Flores Larsen, S. (2016). Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional: ciencia y tecnología para un futuro sustentable. Salta: Instituto de Investigación de Energía No Convencional. INENCO-CONICET.
- Combetto, Benedetti, y Pelicano. (2000). Invernaderos en comunidades rurales en la Puna Jujeña. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 4*.
- Echazú, Quiroga, Saravia, Astudillo, y Palacios. (2004). Diseño construcción y primeros ensayos de invernadero en El Rosal, Provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 8*, 02.43-02.48.
- Flores Larsen, S. (2019). *SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Manual de Usuario*. Salta: INENCO – U.N.Sa.-CONICET.
- Flores Larsen, S. (2020). SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Software para el cálculo del comportamiento térmico de edificios. Salta: INENCO – U.N.Sa.-CONICET.
- Iturry, L. (2002). *Manual de construcción y manejo de Walipinis y Panqar Huyu*. Brigham Young University. Provo, Utah: Benson Agriculture and Food Institute.
- Lenscak, M., y Iglesias, N. (2019). *Invernaderos. Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino (del paralelo 23 al 54)*. Buenos Aires, Argentina: INTA Ediciones. IPAF Región Pampeana.
- Martinez, P., y Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En R. Flores, y J. Victor, *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (págs. 181-247). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Quiroga, Echazú, Saravia, y Palacios. (2005). Simulación con SIMUSOL-LINUX de invernadero andino de El Rosal, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 9*, 02.25-02.30.
- Quiroga, M. y Echazú, R. (2016). Invernaderos y Energía Solar. En M. Laborde, & R. Williams, *Energía Solar*. Buenos Aires: ANCEFN- Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Quiroga, Palacios, Hoyos, y Echazú. (2016). Estudio Experimental de dos invernaderos andinos en El Rosal, Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 20*, 02.21-02.29.
- Quiroga, Rojas, y Echazú. (1999). Cultivo de Flores en Invernadero Andino en Abra Pampa, Jujuy (3484 msnm). *XII Congreso de la Asociación Argentina de Horticultura*. Tucumán.
- Quiroga, Saravia, y Echazú. (1998). Invernadero Andino en Nazareno, Provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 3*, 02.21-02.25.
- Zanabria, P. (2015). Invernaderos sostenibles para la producción de hortalizas en zonas alto andinas del Cusco (Tesis de Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

DESIGN AND THERMAL SIMULATION OF AN ANDEAN SCHOOL GREENHOUSE IN ESTACION SALAR DE POCITOS, PROVINCE OF SALTA.

ABSTRACT: We propose the design and thermal behavior simulation of an Andean greenhouse destined for food production, located in the Public School "7 de Mayo" in Estación Salar de Pocitos, Province of Salta, Argentina. The aim of this study is to evaluate the greenhouse performance during 4 seasons of the year using SIMEDIF 2.0 to simulate indoors temperatures. Design improvements are included: openings and ventilation grilles, with possibility of closing, and trombe-type accumulator walls on the north façade, evaluating two alternatives: wall with an air gap and a single glass and wall with an air gap and HDG. The results are contrasted with daytime and nighttime temperatures recommended for crops. Favorable behavior can be seen during fall and spring months. During winter, facing extreme conditions below zero, interior temperatures manage to stay above crops *lethal temperature*. During summer, ventilation is required to reduce high temperatures and achieve recommended levels.

Keywords: greenhouse, technology, simulation and transfer.