

# Sistemas de cosecha de agua de lluvia en invernaderos del Altiplano boliviano para el riego de cultivos en interiores<sup>1</sup>



Santiago Maldonado Aquino, IISEC-UCB

## Mensajes Clave

- La importancia de los invernaderos se debe a su contribución a la reducción de la pobreza, adaptación al cambio climático y a la seguridad alimentaria.
- La implementación de sistemas de cosecha de agua de lluvia puede representar una solución para garantizar la seguridad hídrica de la producción anual dentro de los invernaderos, posibilitando un acceso sustentable como también seguro a los alimentos.
- La construcción de invernaderos con una superficie de suelo menor a 50 m<sup>2</sup> conectados a un tanque de agua de 1600 L es recomendado, al igual que el incremento de estos puede posibilitar una producción agrícola intensiva y mayores ingresos económicos.

## Introducción

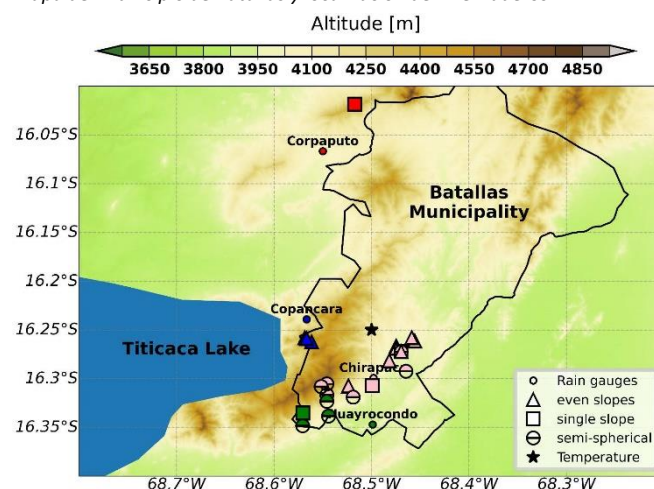
Los invernaderos son conocidos en el mundo del desarrollo rural debido a sus múltiples beneficios: contribuyen al acceso y disponibilidad de alimentos, a dietas más saludables, a mejorar los ingresos y a la eficiencia del uso de recursos naturales para la producción agrícola. Son una tecnología simple de bajo costo que puede ser fácilmente implementada, permitiendo superar los límites ambientales para la agricultura. Es así que en las últimas décadas se incrementó su construcción en zonas rurales donde la actividad agrícola es la principal fuente de ingreso económico. Según el último Censo Agropecuario (2013), Bolivia cuenta con alrededor de 5.000 carpas e invernaderos en territorio nacional, y aproximadamente la mitad de estos se encuentran en el Altiplano.

Acerca de esta vasta región geográfica, se ubica en la parte central de los Andes a lo largo de los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí. Tiene una altitud promedio de 3.500 a 4.500 m.s.n.m., siendo el clima frío, árido y la sequedad características propias de la zona, donde las temperaturas son bajas —con variaciones estacionales— provocando una marcada amplitud térmica diaria. En el seno del Altiplano se encuentra el Municipio de Batallas (lugar donde fue desarrollada la investigación), a 42 km de la ciudad de El Alto y a 49 km de la ciudad de La Paz. Como se observa en la Figura 1, su topografía es variada y se extiende desde la Cordillera Oriental de los Andes hasta las riberas del Lago Titicaca.

En Batallas el clima es predominantemente frío con 8,8 °C de temperatura media anual, mientras que las temperaturas medias mensuales oscilan entre 6 °C (invierno) y 10 °C (verano). El Municipio tiene una actividad agrícola basada en unidades familiares, donde la producción es de subsistencia y en menor grado para la comercialización. Los principales productos cultivados son la papa y la cebada, pero sin posibilidades de cultivo de hortalizas y legumbres durante el año debido a las condiciones climatológicas.

Figura 1

Mapa del Municipio de Batallas y localización de invernaderos



**Nota:** Los invernaderos se representan mediante triángulos (techo parejo), semicírculos (techo semiesférico) y cuadrados (techo de una sola pendiente). Los pluviómetros con al menos 20 años de mediciones diarias de lluvia son representados con círculos y la ubicación de la temperatura diaria con una estrella. Fuente: Sayol et. al. 2022

Las familias del Altiplano —y del Municipio de Batallas en particular— tienen que hacer frente a la escasez de agua potenciada por la crisis climática (IAM, 2023; Flores-Palacios, 2021; Morales et al., 2023). Los cambios en los patrones de lluvias, la dramática disminución de los glaciares andinos, el aumento de la temperatura del aire y las mayores tasas de evapotranspiración son los principales factores que afectan la disponibilidad de agua a corto plazo. Es decir, el cambio climático representa un riesgo y pone en peligro la seguridad alimentaria de las familias del Altiplano, desafiando el éxito de la implementación de invernaderos y aquellas estrategias de adaptación si no se incluyen sistemas de recolección de agua.

<sup>1</sup> Este texto está inspirado en el artículo: “Is Greenhouse Rainwater Harvesting Enough to Satisfy Water Demand of Indoor Crops? Application to the Bolivian Altiplano”, de Juan Manuel Sayol e Isabel Vigo (Universidad de Alicante); Veriozka Azeñas (Universidad de las Islas Baleares e IISEC - Universidad Católica Boliviana “San Pablo”); Carlos Quezada y Jean Paul Benavides (IISEC - Universidad Católica Boliviana “San Pablo”).

## ¿Qué es lo que se ha estudiado?

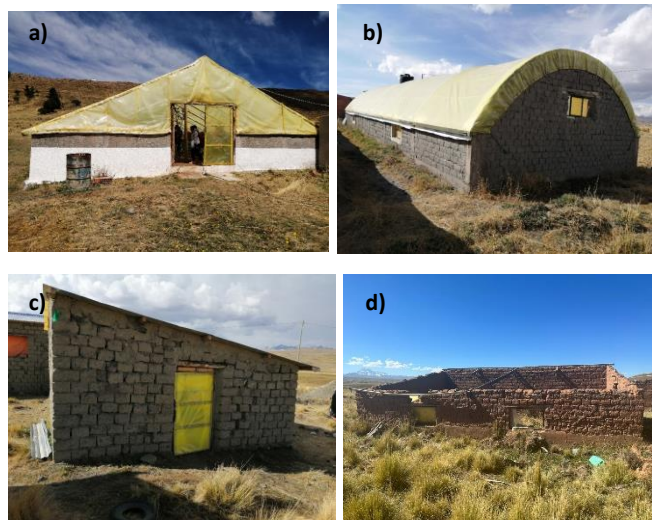
Una gran cantidad de invernaderos se encuentran en el Altiplano boliviano, siendo un proyecto comúnmente desarrollado por ONGs y el propio Estado con programas para la seguridad alimentaria. Sin embargo, no existen suficientes trabajos académicos que estudien los resultados obtenidos y ofrezcan alternativas en un contexto de escasez de agua. Ante esta adversidad, se desarrolló un estudio en el que se plantea una propuesta además de la construcción de invernaderos: los sistemas de cosecha de agua de lluvia. Estos buscan garantizar la seguridad hídrica de la producción anual dentro de los invernaderos (riego de cultivos en interiores) y así mejorar la eficiencia en la producción de alimentos.

Para tal efecto, se ha recopilado información sobre invernaderos en funcionamiento en el Municipio de Batallas, en el extenso trabajo de campo se encontraron varios invernaderos en desuso y con el método de transectos se recopilaron datos sobre 25 invernaderos funcionales. Se efectuaron varias mediciones *in situ* de las dimensiones de invernaderos (superficie de suelo y techo), de su infraestructura (concerniente al material y a las características del sistema de riego instalado) y las prácticas agrícolas actuales (entendidas como el volumen de riego, la fertilización aplicada, la existencia de cultivos y la rotación de estos).

La información recolectada permitió analizar el volumen del agua de lluvia que podría ser cosechada según cada tipo de invernadero, de los cuales, como se observa en la Figura 2, existen hasta cuatro tipos. Esto posibilita identificar el volumen del tanque de almacenamiento de agua y la dimensión del techo más adecuado para satisfacer la demanda de agua de los invernaderos. Para tal efecto, se consideró la cantidad de lluvia local, la frecuencia de riego estimada o aproximada, el coeficiente de escorrentía y los requerimientos de agua de los cultivos producidos en cada uno de los 25 invernaderos estudiados.

**Figura 2**

*Tipos de invernaderos en el Municipio de Batallas*



*Nota:* Fotografías que ilustran los diferentes tipos de invernaderos utilizados por los agricultores locales: (a) dos pendientes, (b) semiesférico, (c) pendiente única, (d) en desuso. Fuente: Sayol et. al. 2022

El objetivo principal fue encontrar aquellos invernaderos que satisfagan mejor la demanda de agua con fines agrícolas desde dos perspectivas: (1) en base al manejo del agua para riego que desarrollan los agricultores locales, y (2) en base al agua requerida por los cultivos más comunes si los invernaderos fueran cultivados en su máximo potencial. De este modo, los 25 invernaderos incluidos en el estudio se encuentran a unos 4.000 m.s.n.m., mismos que suelen albergar más de un cultivo ya que los agricultores habitualmente siembran varias especies al mismo tiempo. De hecho, normalmente entre dos y cinco hasta un máximo de siete, la razón principal es que en su mayoría cultivan para el autoconsumo y, en caso de excedente, para su comercialización.

Asimismo, la información proporcionada puede ser utilizada por instituciones gubernamentales, Cooperación Internacional y ONGs para decidir políticas de inversión en infraestructuras en la región del Altiplano boliviano. Recordando que el enfoque empleado en la investigación puede ser extrapolado y aplicado a cualquier otro territorio o región. Para tal efecto, es imprescindible que se disponga de una base de datos o información referente a ciertos campos indispensables (entre ellos figuran las lluvias existentes, la temperatura oscilante y los invernaderos actuales en uso).

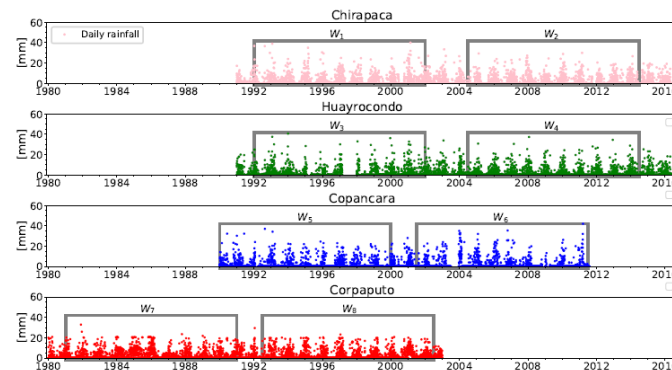
La gran mayoría de investigaciones precedentes estudiaron el balance hídrico de techos de invernaderos a escala mensual, mientras que la presente investigación analizó el balance hídrico a escala diaria. Esta frecuencia es más realista en razón a que minimiza la pérdida de agua durante los episodios de lluvias intensas, además permite un mejor seguimiento del agua capturada, almacenada y utilizada casi en tiempo real. En este sentido, se calcularon una serie de variables y parámetros incluidos en las simulaciones de balance hídrico, los cuales pueden ser agrupados en dos subconjuntos: variables y parámetros principales, y variables y parámetros secundarios.

### **Variables y parámetros principales**

En el primer subconjunto se encuentran los datos de lluvia que fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI), provenientes de las estaciones más cercanas a la ubicación de los invernaderos como se observa en la Figura 3. En este caso, de las estaciones meteorológicas de Chirapaca, Huayrocondo, Copancara y Corpaputo; cada una de estas con ventanas de tiempo entre 1980 y el 2015 aproximadamente.

**Figura 3**

*Datos de lluvia de invernaderos en el Municipio de Batallas*



*Nota:* Series temporales de lluvia de las estaciones meteorológicas más cercanas a los invernaderos. Para cada serie tiempo se eligió dos ventanas de tiempo que abarcan 10 años y no se superponen entre sí. Fuente: Sayol et. al. 2022

A su vez, los datos de temperatura forman parte del grupo de variables y parámetros principales, donde se utilizó datos de temperatura global del *Climate Prediction Center (CPC)*. Este conjunto de datos está construido a partir de 6.000 a 7.000 estaciones meteorológicas globales aproximadamente, las cuales proporcionan temperaturas diarias máximas ( $T_{\max}$ ) y temperaturas diarias mínimas ( $T_{\min}$ ) desde 1979. Cabe mencionar que, debido a la superficie relativamente pequeña del Municipio de Batallas, no se utilizaron series de tiempo medias.

Seguidamente, las simulaciones de agua de lluvia recolectada por techos de invernaderos integran el primer grupo, donde se realizó dos tipos de simulaciones que incorporan el agua recolectada por el techo del invernadero, así como la cantidad de agua utilizada para el riego. En el primer tipo se inicia con la información proporcionada por los agricultores sobre la frecuencia y duración de riego (simulaciones Tipo 1). Mientras que en el segundo tipo se plantea la hipótesis de que la superficie del suelo de cada invernadero se cultiva con un tipo o una combinación de cultivos, mismos que se riegan de manera eficiente de acuerdo con su necesidad hídrica (simulaciones Tipo 2).

Finalmente, para el cálculo de los requisitos de agua para los cultivos de las simulaciones, es necesario estimar las necesidades de agua del cultivo dentro de un invernadero, lo cual requiere del cálculo de: i) la evapotranspiración de referencia del cultivo al aire libre, y ii) la evapotranspiración del cultivo de interés dentro del invernadero.

### **Variables y parámetros secundarios**

El coeficiente de escorrentía ( $C_r$ ) forma parte del grupo de parámetros secundarios, el mismo contempla las pérdidas debidas a fugas, derrames, humedecimiento de la superficie de captación y evaporación. En el estudio, todos los techos de los invernaderos están contruidos con polietileno, que tiene un  $C_r$  que oscila entre 0,9 – 0,95 si se encuentra en buenas condiciones de mantenimiento, disminuyendo a medida que se degrada. Por lo tanto, se seleccionó los valores de 0,8 y 0,9 para las simulaciones de Tipo 1.

A su vez, también se consideró el volumen máximo de agua de lluvia que puede almacenar un depósito de acuerdo con los tanques disponibles en el mercado. En referencia a la frecuencia de riego, según los datos recopilados los agricultores tienden a regar cada 2 o 3 días. Paralelamente, el volumen de agua utilizado para regar los cultivos de invernadero en simulaciones de Tipo 1, el cual depende de las características del sistema de riego, la duración de cada evento de riego y el porcentaje de la superficie cultivada.

Para finalizar, considerando que los invernaderos tienen márgenes estándar de 50 cm por cada lado y teniendo en cuenta la distancia entre los surcos donde se ubica el sistema de riego por goteo, solo se cultiva cerca del 80% de la superficie total del invernadero. Aunque este porcentaje puede oscilar entre el 75% y el 85% dependiendo del invernadero. Por esta razón, en las simulaciones, se multiplicó por 0.8 el valor de la superficie total del invernadero.

### **Resultados y lecciones aprendidas**

Se evidencia que la disponibilidad de invernaderos con sistemas integrados de recolección de agua puede representar una solución para garantizar la seguridad hídrica de la producción de cultivos durante todo el año, asegurando un acceso sustentable y seguro a los alimentos. Algunos invernaderos permiten recolectar suficiente agua para regar los cultivos de manera regular durante la estación húmeda, mientras que durante la estación seca los invernaderos no pueden satisfacer más del 50% de los requisitos teóricos de agua, incluso considerando tanques grandes de agua.

En base a estos resultados, es apropiado establecer una adecuada selección del calendario de cultivos (incluyendo una planificación de la fase de cultivo) ya que puede contribuir a optimizar la producción. Asimismo, se recomienda la construcción de invernaderos con una superficie de suelo igual o menor a los 50 m<sup>2</sup> y que estén conectados al tanque de agua cubierto más grande disponible en el mercado, en este caso al de 1600 L.

A su vez, los resultados muestran que el nivel de riego realizado por los agricultores dista significativamente del riego teóricamente requerido en caso de que el invernadero fuera usado para una producción intensiva. En este escenario hipotético, los agricultores podrían lograr una producción superior mediante la instalación de tanques de agua. Esto permitiría una mayor comercialización de sus productos y mejor acceso a alimentos saludables, como hortalizas, potenciando así un incremento en sus ingresos y seguridad alimentaria.

Sin embargo, el mayor freno para una mayor producción se debe a que en la actualidad la superficie del suelo de numerosos invernaderos no se cultiva de manera eficiente. Los agricultores producen principalmente para su subsistencia, siendo una restricción principal la falta de tanques de agua. Esto desalienta una producción más intensiva ante el riesgo real de escasez de agua, especialmente durante la estación seca en el caso de que los agricultores dependan totalmente de las lluvias o utilicen riego por inundación para sus cultivos.

De este modo, la información proporcionada puede ser utilizada por las partes interesadas para decidir políticas de inversión en infraestructuras en el Altiplano boliviano, ya sea diseñando invernaderos con una superficie óptima de los techos, o en la capacidad de los tanques de agua para cubrir completamente la demanda de los cultivos.

Quedando claro que los esfuerzos del sector público, ONGs, Cooperación Internacional e investigadores en la implementación y evaluación de invernaderos deben considerar los siguientes beneficios de integrar sistemas de captación de agua de lluvia:

- Aumenta la productividad de los cultivos debido a un mayor volumen de agua disponible para riego, lo que es especialmente útil durante la época seca, dependiendo del diseño de las infraestructuras y el contexto climático de la localidad.
- Mejora la eficiencia del uso de agua y reduce el riesgo de agotamiento de este recurso, principalmente en áreas donde se utilizan aguas subterráneas para actividades agrícolas.
- Promueve la adopción de invernaderos con sistemas de cosecha de agua en zonas donde este recurso vital escasea y/o las heladas son frecuentes.

Finalmente, los estudios futuros destinados a evaluar el impacto de las variaciones en estos sistemas hidrológicos a gran escala también deberían considerar la reducción del caudal de los ríos y la recarga más lenta de las fuentes de agua subterránea por escorrentía.

### **Información complementaria**

Los actores que participaron en la investigación fueron familias productoras del Municipio de Batallas. La investigación fue realizada en el marco del proyecto: “¿Son los invernaderos socioeconómica y ambientalmente sostenibles?”, proyecto ganador de la 5ta versión del concurso “Pequeños Proyectos de Investigación” financiado por la Universidad Católica Boliviana “San Pablo”.

Asimismo, esta investigación contó con financiamiento de la Generalitat Valenciana a través de la Consellería de Participación, Transparencia, Cooperación y Calidad democrática; el Fondo Social Europeo (FSE) a través de la subvención APOSTD/2020/254; y de la Universidad de Alicante a través del Vicerrectorado de Relaciones Internacionales y Cooperación para el Desarrollo.

#### **Autor del Policy Brief**

Santiago Maldonado Aquino

[walter.maldonado@ucb.edu.bo](mailto:walter.maldonado@ucb.edu.bo)

Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC) – Universidad Católica Boliviana “San Pablo”, Av. 14 de Septiembre N° 4836, La Paz, Bolivia

#### **Autores del documento base**

Juan-Manuel Sayol

[juanma.sayol@ua.es](mailto:juanma.sayol@ua.es)

Isabel Vigo

[vigo@ua.es](mailto:vigo@ua.es)

Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Alicante, Carr. de San Vicente del Raspeig, s/n, San Vicente del Raspeig, 03690 Alicante, España

Veriozka Azeñas

[veriozka.am@gmail.com](mailto:veriozka.am@gmail.com)

Departamento de Biología, Universitat de les Illes Balears, Carr. de Valldemossa, km 7,5, 07122 Palma, España

Carlos E. Quezada

[cquezada@ucb.edu.bo](mailto:cquezada@ucb.edu.bo)

Jean-Paul Benavides López

[jbenavides@ucb.edu.bo](mailto:jbenavides@ucb.edu.bo)

Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC) – Universidad Católica Boliviana “San Pablo”, Av. 14 de Septiembre N° 4836, La Paz, Bolivia

## Referencias Bibliográficas y documentales

Flores-Palacios, X. (2021). *Climate hazards in the northern Bolivian Altiplano*. UCL Institute for Risk and Disaster Reduction. Recuperado de: <https://blogs.ucl.ac.uk/irdr/2021/07/14/climate-bolivia/>

Iniciativa Andina de Montañas. (IAM, 2023). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña de la región andina*. Estudio regional organizado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). La Paz: DEUMAN.


Instituto Nacional de Estadística. (INE, 2015). *Censo Agropecuario 2013 Bolivia*. La Paz: INE.


Morales, M. S., Crispín-DelaCruz, D. B., Álvarez, C., Christie, D. A., Ferrero, M. E., Andreu-Hayles, L., Villalba, R., Guerra, A., Ticse-Otarola, G., Rodríguez-Ramírez, E. C., Llocclla-Martínez, R., Sanchez-Ferrer, J., & Requena-Rojas, E. J. (2023) *Drought increase since the mid-20th century in the northern South American Altiplano revealed by a 389-year precipitation record*, *Clim. Past*, 19, 457–476, <https://doi.org/10.5194/cp-19-457-2023>.

Sayol, J.-M.; Azeñas, V.; Quezada, C.E.; Vigo, I.; Benavides López, J.-P. (2022). Is Greenhouse Rainwater Harvesting Enough to Satisfy the Water Demand of Indoor Crops? Application to the Bolivian Altiplano. *Hydrology*, 9, 107. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060107>

El Instituto de Investigaciones Socio-Económicas de la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” fundada en 1974 se dedica al estudio académico riguroso sobre temas que conectan la sociedad y la economía boliviana y latinoamericana. En sus más de cuarenta años de trabajo, el IISEC se ha constituido en uno de los institutos de investigaciones sociales y económicas con mayor trayectoria en Bolivia.

#### Información de Contacto

 Av. 14 de Septiembre Nº 4836  
(entre calles 2 y 3), Obrajes, La  
Paz

 (591-2)2782222 Int. 2738

 [iisec@ucb.edu.bo](mailto:iisec@ucb.edu.bo)

 <http://www.iisec.ucb.edu.bo>

#### Acerca del autor del *Policy Brief*

Santiago Maldonado Aquino es estudiante de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales en la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (Bolivia), y asistente de investigación del Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC).

#### Acerca de los autores del documento base

Juan Manuel Sayol es doctor en Física por la Universidad de las Islas Baleares (España), y es Profesor Ayudante – Doctor en el Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Alicante (España).

Veriozka Azeñas es doctora en Biología de las Plantas por la Universidad de las Islas Baleares (España), e investigadora asociada del Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC).

Carlos Quezada es Ingeniero Ambiental por la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (Bolivia), e investigador del Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC).

Isabel Vigo es doctora en Ciencias Matemáticas por la Universidad de Alicante (España), y es Catedrática de Escuela Universitaria en la Universidad de Alicante (España).

Jean Paul Benavides López es doctor en Sociología por la Universidad de Lille (Francia), e investigador senior del Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC).