

REAL ACADEMIA
DE
CÓRDOBA

COLECCIÓN
MIGUEL ÁNGEL
ORTI BELMONTE

IV

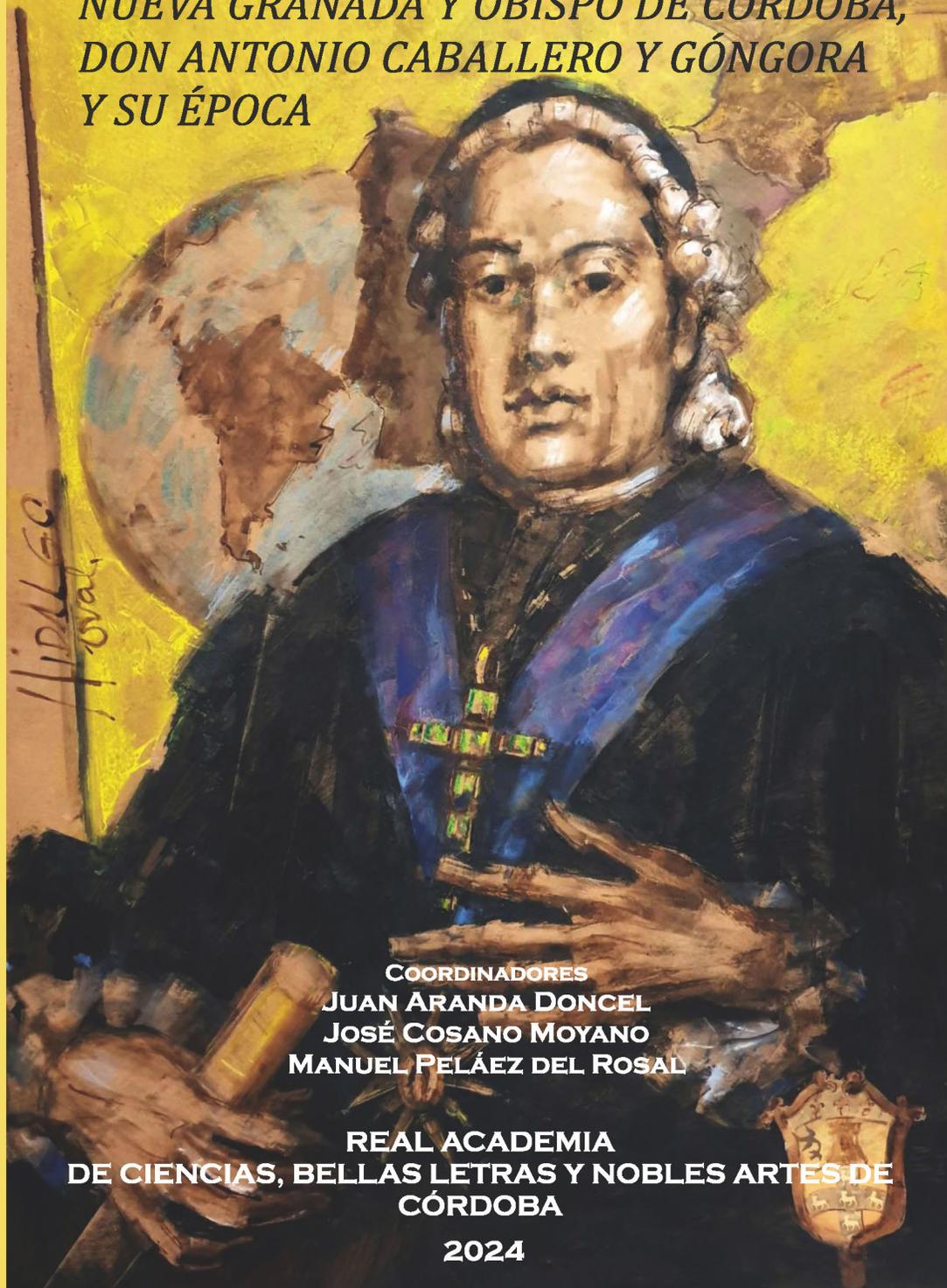
ACTAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL
EL ARZOBISPO DE SANTA FE, VIRREY DE NUEVA
GRANADA Y OBISPO DE CÓRDOBA, DON ANTONIO
CABALLERO Y GÓNGORA Y SU ÉPOCA

JUAN ARANDA DONCEL
JOSÉ COSANO MOYANO
MANUEL PELÁEZ DEL ROSAL
COORDINADORES



2024

ACTAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL
*EL ARZOBISPO DE SANTA FE, VIRREY DE
NUEVA GRANADA Y OBISPO DE CÓRDOBA,
DON ANTONIO CABALLERO Y GÓNGORA
Y SU ÉPOCA*



COORDINADORES

JUAN ARANDA DONCEL
JOSÉ COSANO MOYANO
MANUEL PELÁEZ DEL ROSAL

REAL ACADEMIA
DE CIENCIAS, BELLAS LETRAS Y NOBLES ARTES DE
CÓRDOBA

2024

**JUAN ARANDA DONCEL
JOSÉ COSANO MOYANO
MANUEL PELÁEZ DEL ROSAL**
Coordinadores

**ACTAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL
*EL ARZOBISPO DE SANTA FE, VIRREY DE
NUEVA GRANADA Y OBISPO DE CÓRDOBA,
DON ANTONIO CABALLERO Y GÓNGORA
Y SU ÉPOCA***

**REAL ACADEMIA DE CÓRDOBA
2024**

ACTAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL
*EL ARZOBISPO DE SANTA FE, VIRREY DE NUEVA GRANADA Y
OBISPO DE CÓRDOBA, DON ANTONIO CABALLERO Y GÓNGORA
Y SU ÉPOCA*

Coordinadores:

Juan Aranda Doncel
José Cosano Moyano
Manuel Peláez del Rosal

Portada: Cartel del Congreso, obra del pintor Juan Hidalgo del Moral

© De esta edición: Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba

© Los autores del libro

ISBN: 978-84-128686-0-9

Dep. Legal: CO 913-2024

Impreso en Litopress. Edicioneslitopress.com. Córdoba

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito del Servicio de Publicaciones de la Real Academia de Córdoba.

LOS SUKA KOLLUS: UNA TÉCNICA HIDRÁULICA ANCESTRAL ANDINA

José Roldán Cañas
Académico Numerario

René Chipana Rivera
Académico Correspondiente

María Fátima Moreno Pérez
Académica Correspondiente

Resumen

En la zona circundante al lago Titicaca, se desarrolló la tecnología de los *Suka Kollus*, muy probablemente para hacer frente a las inundaciones mediante el drenaje del exceso de agua, para el riego subsuperficial de cultivos andinos y a la vez para elevar la temperatura del ambiente como medio de defensa contra las heladas, convirtiendo así a este agroecosistema en menos vulnerable. Los *Suka Kollus* están considerados entre las estructuras hidráulicas más importantes de las tecnologías Andinas y podrían ser una forma valiosa para usar suelos marginales si algunos de los canales de drenaje son reemplazado por drenes subsuperficiales para aumentar el área de cultivo. Esta técnica precolombina es común en terrenos de las actuales México, Colombia, Perú, Bolivia, Ecuador y Surinam, es decir, comprendía los cuatro virreinos existentes en América: Nueva España; Nueva Granada, Perú y Río de la Plata.

Palabras clave: Riego subsuperficial; región Andina; capa freática; tecnología prehispánica.

Abstract

In the area surrounding Lake Titicaca, the *Suka Kollus* technology was developed, most likely to deal with flooding by draining excess water, for sub-surface irrigation of Andean crops and at the same time to raise the temperature of the environment as means of defense against frost, thus making this agroecosystem less vulnerable. The *Suka Kollus* are considered among the most important hydraulic structures of Andean technologies and could be a valuable way to use marginal soils if some of the drainage channels are re-

placed by subsurface drains to increase the crop area. This pre-Columbian technique is common in areas of present-day Mexico, Colombia, Peru, Bolivia, Ecuador and Suriname, that is, it included the four viceroyalties existing in America: New Spain; New Granada, Peru and Río de la Plata.

Keywords: Subsurface irrigation; Andean región; Water table; pre-Hispanic technology.

1. Introducción

En los Andes se practica aún hoy día una técnica hidráulica que combina riego y drenaje en una misma estructura: los *Suka Kollus*, en lengua aymara, o *Waru-Waru* en quechua. Tanto en inglés como en español se usan términos menos precisos, «*Raised fields*» en el primer caso o «*Camellones*» en el segundo.

Estas estructuras consisten en plataformas elevadas de tierras agrícolas rodeadas de canales repletos de agua. Las tierras excavadas de los canales se vierten en los terrenos intermedios formando las plataformas elevadas sobre el nivel del agua en los canales.

Esta tecnología ancestral combina riego subsuperficial y drenaje en una misma estructura y se desarrolló en áreas andinas de Perú y Bolivia (Ortloff, 1999) dentro de la cultura de Tiwanaku, especialmente en zonas circundantes al lago Titicaca fácilmente inundables pues la capa freática está muy próxima a la superficie por lo que su función prioritaria es la de drenaje. Asimismo, estos canales riegan subsuperficialmente los cultivos situados en las plataformas y crean un microclima que ayuda a mitigar los efectos de las heladas convirtiendo a este agroecosistema en menos vulnerable, obteniéndose de esta manera elevadas producciones, se reciclan los nutrientes contenidos en la materia orgánica de los canales, se drena el exceso de agua e irrigan las plantaciones (Erickson, 1992). Otros autores (Rodrigues et al., 2016) han estudiado otros camellones encontrados también dentro de Bolivia, concretamente en los Llanos de Moxos, en el Departamento de Beni en una de las llanuras aluviales más grandes de Latinoamérica.

En el caso de Colombia, estas técnicas se desarrollaron bajo la cultura Sinú ubicada en su costa norte. Allí los campos surcados actúan como una red de drenaje permitiendo y restringiendo los flujos de agua hacia un sistema complejo de canales. Esta región queda

inundada durante siete meses al año (de abril a noviembre) pero gracias a los montículos de los surcos que sobresalen del agua es posible cultivar durante todo este periodo (Oyuela-Caicedo, 2008). También han sido reportados otros camellones prehispánicos en el golfo de Urabá, noroccidente de Colombia (Posada-Restrepo, et al., 2019).

En México se encuentra una técnica similar, las *Chinampas*, palabra que proviene del náhuatl *chinampan*, que significa «en la cerca de cañas», que permiten cultivar en zonas lacustres de poca profundidad del mismo modo que las anteriores y que ya fue utilizado por los Mexicanos. Aún hoy se conservan fundamentalmente en el lago de Xochimilco al sur de la Ciudad de México. La zona fue declarada Patrimonio Mundial de la Humanidad en 1987 (https://enlacesx.xoc.uam.mx/wp-content/uploads/2022/11/sistema_de_chinampas.pdf).

Parsons y Denevan (1967) identificaron cuatro zonas en Sudamérica en las que se han encontrado camellones precolombinos: Bolivia Oriental y norte de Colombia, ya comentados, y Ecuador occidental y costa de Surinam.

Así pues, esta técnica precolombina es común en terrenos de las actuales México, Colombia, Perú, Bolivia, Ecuador y Surinam, es decir, comprendía los cuatro virreinos existentes en América: Nueva España; Nueva Granada, Perú y Río de la Plata

Este trabajo se centra en el estudio y análisis de los *Suka Kollus* con los que el equipo redactor ha estado trabajando desde 2007 (Chipana Rivera et al, 2011). Actualmente, gran parte de los *Suka Kollus* están abandonados por diversas razones. El factor más importante es que las condiciones sociales, políticas y económicas son diferentes comparadas con hace más de 2000 mil años. Otros factores son la disminución de la superficie de cultivo por el área ocupada por los canales, las exigencias de la competitividad laboral, los ciclos de barbecho, la pérdida genética de los cultivos, la competencia con la ganadería y el predominio de la agricultura familiar sobre la comunal (Chipana Rivera, 2008).

La infraestructura de *Suka Kollus* fue abandonada antes o inmediatamente después de la conquista española, y la mayoría de los campos fueron convertidos en áreas de pastoreo para las haciendas coloniales. A principios de los años 80 se comenzaron a reconstruir. Debido al

éxito de los trabajos iniciales, se emprendieron, entre los años 1981 y 1987, nuevos proyectos de (re)construcción de *Suka Kollus* en Bolivia y Perú. Algunos sostenían la idea de que eran la solución a la pobreza rural de los Andes. Sin embargo, a mediados de los años noventa, algunos investigadores empezaron a criticar dichos proyectos por el abandono de los *Suka Kollus* rehabilitados, cuestionando la sostenibilidad de esta tecnología.

Asimismo, los rendimientos de los cultivos, sobre todo de papa, bajaron notablemente porque no es posible cultivar de forma continua e intensiva sin periodos de barbecho (descanso), especialmente por la existencia de nemátodos cuya población en el suelo va creciendo con la presencia de huéspedes adecuados.

Por las razones mencionadas, en la actualidad el futuro de esta tecnología está en entredicho, debido al poco interés y entusiasmo de agricultores e instituciones. No obstante, si se aborda adecuadamente el manejo de cultivos en *Suka Kollus* (social, económica y técnicamente) y tomando en cuenta la coyuntura actual (agricultura de subsistencia con bajo nivel tecnológico y reducida superficie de cultivo) sigue constituyendo una opción para habilitar suelos marginales e inadecuados para la agricultura (salinos, inundados y praderas ubicadas en zonas bajas en proceso de erosión). Estos aspectos permitirían la plantación no sólo de cultivos andinos, sino también de hortalizas (cebolla, ajo, zanahoria, etc.) y forrajes convencionales y de invierno, bajo la óptica de una producción integrada (agrícola y pecuaria). Otra utilidad no explotada hasta ahora es el uso de estos agroecosistemas ancestrales con fines paisajísticos y manejo de bofedales (humedales), lo que atraería el turismo nacional e internacional. Una opción de mejora ha sido considerada en este trabajo aumentando la superficie de las plataformas mediante el uso de drenes subsuperficiales.

2. Descripción de los *Suka Kollus*

Los *Suka Kollus*, fueron construidos para hacer frente a las inundaciones mediante el drenaje del exceso de agua, el riego subsuperficial y a la vez para elevar la temperatura del ambiente como medio de defensa contra las heladas, convirtiendo así a este agroecosistema en menos vulnerable. Son plataformas de tierra de cultivo elevadas, con 1

a 20 metros de ancho, 10 a 100 de metros de largo, y 0,5 a 1 metro de alto. Están rodeados de canales de 1 a 4 m de ancho con una profundidad de 0,5 a 1 m

Básicamente, consisten en una serie de plataformas de tierra rodeadas por canales de agua y ordenadas de diferente manera, según la pendiente. Los *Suka Kollus* se construyen excavando el terreno para la formación de canales de tierra. El suelo de los canales se distribuye encima de las plataformas, elevando la superficie original del suelo. Los cultivos se instalan sobre las plataformas de tierra, y los canales circundantes deben estar conectados con entradas y salidas de agua (Figura 1).

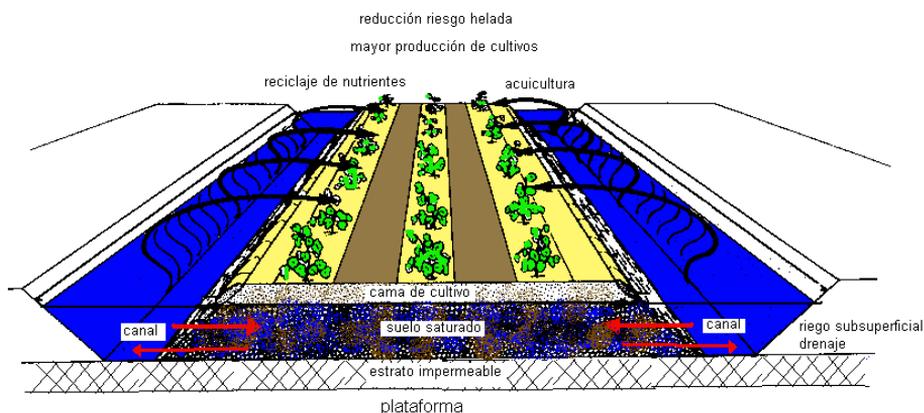


Figura 1. Esquemización del sistema de producción en *Suka Kollus* (Nakajima, 2004)

El agua que circula en los canales entre las plataformas (Figura 2) tiene efectos benéficos sobre el microclima, pues regula la temperatura local absorbiendo la energía solar a lo largo del día, que se irradia al suelo circundante y al aire en la noche (Kolata y Ortloff, 1989). Nakajima (2004) indica que los *Suka Kollus* permiten por su configuración (plataformas de tierra alternadas con canales de agua) la concentración y liberación de calor, pues se mantiene una temperatura estable sobre ellas durante la noche, razón por la cual el sistema se ha presentado como una técnica agrícola idónea para amortiguar las heladas y favorecer una alta productividad. Sánchez de Lozada et al. (1998)

muestran que el efecto de mitigación de heladas es esencialmente la consecuencia de procesos aéreos relacionados con la circulación del aire durante la noche desde los canales hacia las plataformas.



Figura 2. *Suka Kollus* cultivados en los alrededores del lago Titicaca (Lhomme y Vacher, 2003)

Se estima que los *Suka Kollus* cubren más de 120.000 ha en la cuenca del Lago Titicaca, pero la mayoría están abandonados (Figura 3). Las excavaciones arqueológicas de los camellones demostraron que su construcción inicial se dio hacia el año 1000 a.C. donde la producción de los *Suka Kollus* y otras formas de agricultura intensiva aseguraron el desarrollo de las sociedades complejas que se encontraban dentro de la referida cuenca (Erickson, 2006). Ortloff (1999) sostiene que, dadas las condiciones climáticas del Altiplano boliviano y la pobre naturaleza de sus suelos, la única alternativa para mantener una próspera civilización como la de Tiwanaku, con una población total en el área circundante al lago Titicaca de cerca de un millón de personas, fue la invención de la agricultura de los *Suka Kollus*.

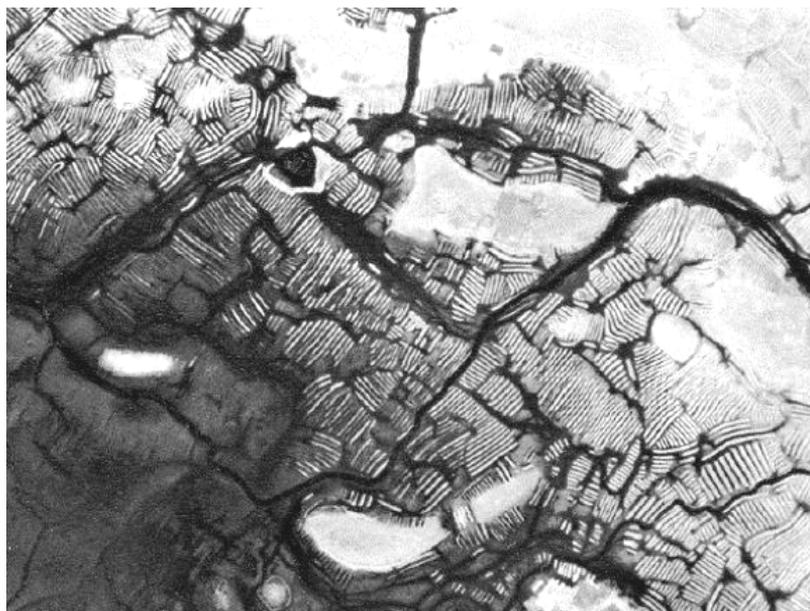


Figura 3. Fotografía aérea de *Suka Kollus* precolombinos cerca del lago Titicaca con canales (líneas oscuras) y plataformas (líneas menos oscuras) (Erickson, 2006)

Las regiones inundables como las que rodean al lago Titicaca tienen como característica un nivel freático cercano a la superficie, que se mantiene generalmente estacionario con ligeros descensos en la época seca. Por tanto, debido a la presencia de los canales que aportan un volumen adicional de agua, se forma una capa freática más elevada que el nivel freático normal. Así, los canales tienen una doble utilidad: en la temporada de lluvias (octubre a febrero) el nivel freático normal sube entonces y los canales sirven para drenar el exceso de agua; en cambio en la temporada seca (abril a septiembre) suministran agua a las plataformas para el riego subsuperficial.

3. Producción del cultivo de papa en *Suka Kollus*

Morales (2008) después de analizar información sobre la producción de papa en el periodo 1994 a 2008 en las zonas suka kolleras del Altiplano boliviano señala que la distribución de frecuencias de rendimientos del cultivo muestra un sesgo positivo, lo que indicaría que los datos no se ajustan a una distribución normal, sino a una distribu-

ción Weibull, debido a que existe una fuerte tendencia de rendimientos elevados, lo que está expresado en el gráfico de barras de la Figura 4. Similar tendencia se observa en los datos de rendimientos por sistemas de producción, donde se evidencia que la producción de papa es superior en los *Suka Kollus*, comparado con el sistema de pampa (sistema de cultivo tradicional a secano efectuado en las planicies del Altiplano) y ladera (sistema de cultivo tradicional a secano efectuado en las laderas de las serranías que rodean al Altiplano). Cabe destacar el rendimiento alcanzado por Yucra (2006) en *Suka Kollus* de la localidad de Batallas, que fue de 71,72 Mg/ha.

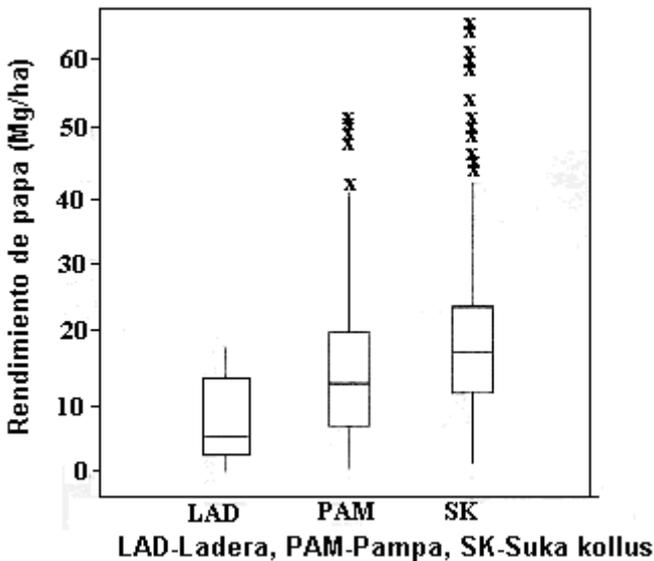


Figura 4. Rendimiento del cultivo de papas (Mg/ha) por sistema de producción (Morales, 2008)

4. El agroecosistema de los *Suka Kollus*

Los *Suka Kollus* constituyen un agroecosistema con amplias connotaciones ambientales e interacciones ecológicas más allá de su uso para producir alimentos (Renard et al., 2012).

Lhomme y Vacher (2003) efectuaron experimentos micrometeorológicos minuciosos en *Suka Kollus* durante los años 1994 y 1995, en la zona de Kallutaca (cerca del Lago Titicaca). En la Figura 5

se presenta una serie temporal de temperatura mínima diaria del cultivo de papa medido a 10 cm de altura, para los *Suka Kollus* y pampa. Las temperaturas varían entre 2 °C y -10 °C. La temperatura mínima en *Suka Kollus* fue siempre mayor que en pampa, entre 1 a 2 °C, lo que es una indicación de la atenuación de las heladas.

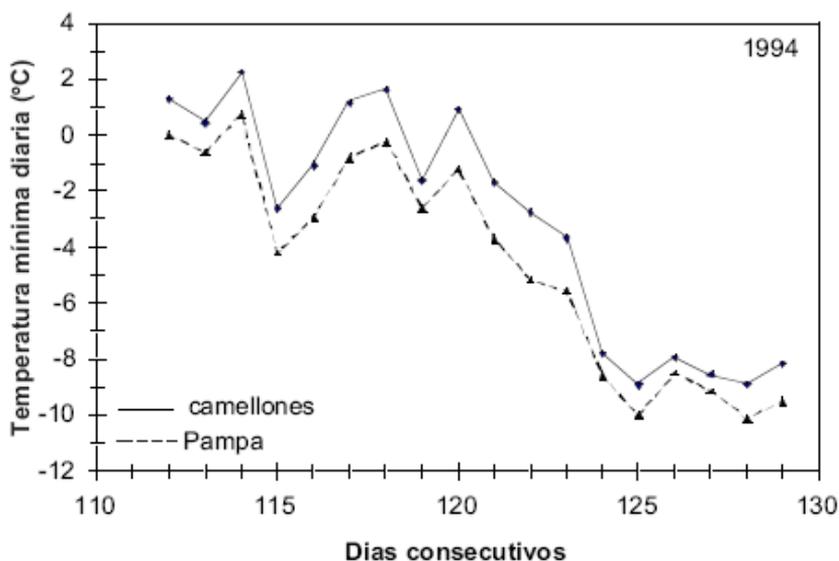


Figura 5. Variación de la temperatura mínima diaria del aire a 10 cm de la superficie del suelo en *Suka Kollus* y en pampa (Lhomme y Vacher, 2003)

Sanchez de Lozada et al. (1998) encontraron también que en los *Suka Kollus* la temperatura mínima del agua es muy superior a la de las plataformas, y encima de esta la temperatura es menor cerca de la superficie del suelo. Las temperaturas mínimas en pampa fueron menores que en *Suka Kollus* (Figura 6).

En el caso de los canales, tanto la temperatura de la superficie del agua como la del interior de la masa de agua mantienen un comportamiento moderado y uniforme, es decir, tardan más en calentarse y en compensación tardan más en enfriarse. De esta manera el agua en los canales produce un efecto termoregulador. En efecto, Yucra (2006) señala que la radiación solar que absorbe el agua es utilizada para aumentar su energía interna; así como la absorbe, también la pierde.

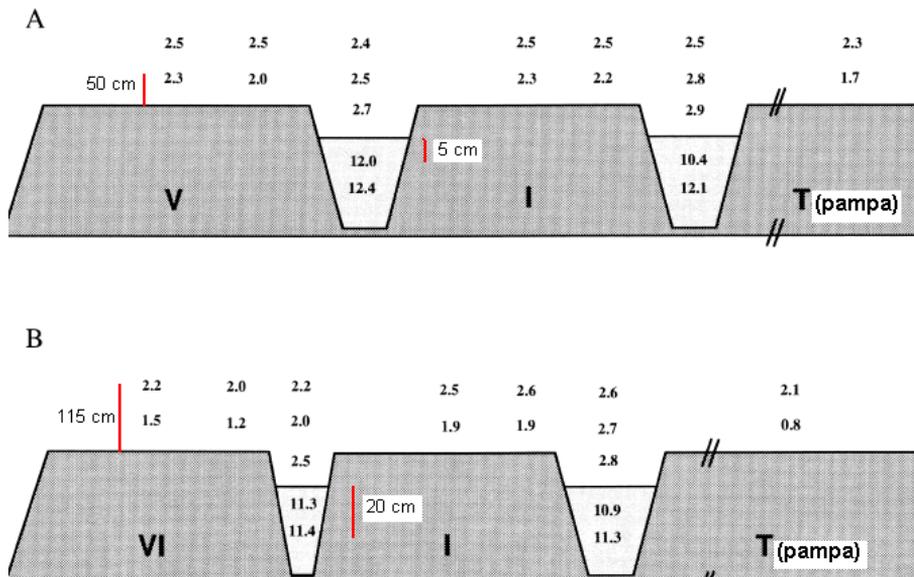


Figura 6. Distribución de la temperatura promedio mínima ($^{\circ}\text{C}$) en la superficie de la plataforma y en los canales de los *Suka Kollus* para la zona experimental de Chucara (A) y de Achacachi (B) (Sanchez de Lozada et al., 1998).

Sanchez de Lozada (1996), apoya la hipótesis de la circulación del aire húmedo desde los canales hacia las plataformas, es decir, dado que la presión parcial del vapor de agua decrece desde el canal hacia el centro de las plataformas, se produce una circulación de aire húmedo debido al gradiente de humedad. El aire cercano a la superficie del agua normalmente tiene un contenido de humedad más alto y la humedad relativa se incrementa mientras el aire asciende y se enfría. En este proceso de circulación, el aire con alto contenido de humedad en la superficie de los canales se mueve hacia el centro de las plataformas, y ocurre una mezcla con el aire seco. Cuando el aire desciende cerca de la superficie del suelo, se enfría hasta una temperatura cercana al punto de rocío, llegando la presión de vapor de agua a igualarse a la presión de vapor a saturación. Este proceso confirma la descripción de la literatura de la formación de una neblina que cubre los camello-nes durante las heladas.

Huanca (1996) afirma que por efecto del incremento de la humedad relativa del aire en los *Suka Kollus* la temperatura del punto de rocío se eleva con relación al testigo. Por tanto, habrá mayor conden-

sación de agua sobre las hojas del cultivo produciéndose un mecanismo adicional para la protección de los tejidos (transferencia de calor sensible al aire circundante).

Lhomme y Vacher (2003), indican que la humedad del aire tiene un impacto positivo sobre la mitigación de heladas. Cuando la humedad relativa aumenta de 50 a 100%, la temperatura mínima del cultivo puede incrementarse de 1 a 3 °C, según los días. Este efecto está relacionado obviamente con una mayor condensación del vapor de agua sobre las hojas y un balance de radiación menos negativo. Este efecto es notorio a partir del 75% de humedad relativa.

Sánchez de Lozada et al. (1998) también demostraron experimentalmente que la transferencia de calor ocurre esencialmente en el aire y no en el suelo, ya que el flujo de calor de los canales hacia las plataformas utilizando al suelo como medio conductor no es suficiente como para contribuir de manera significativa al efecto de mitigación de heladas. Este efecto se produce por la diferencia de temperaturas entre *Suka Kollus* (plataforma y canal) y pampa, aunque también observaron que existe una condensación de agua en las hojas de las plantas resultado de una elevada humedad relativa, lo que hace posible la formación de escarcha para atenuar los efectos de la helada.

Stache (2000) determinó el potencial del agua del suelo (tensión) en el sistema de *Suka Kollus* y pampa, en la zona de Batallas. En la Figura 7 se presenta: (A) la precipitación ocurrida en el periodo, (B) el potencial promedio del agua del suelo de *Suka Kollus* para dos profundidades 15 y 25 cm bajo la superficie y (C) el potencial promedio del suelo de pampa para las dos mismas profundidades. En el sistema de *Suka Kollus* los potenciales son mayores a una profundidad de 25 cm debido a que está más próximo a la zona de saturación del suelo. Lo contrario ocurre en el suelo de la pampa, donde los potenciales son menores a esa profundidad. Dentro de las plataformas, el potencial del agua a 15 cm de profundidad varía entre -50 y -450 hPa, con una tendencia que sigue la ocurrencia de las precipitaciones, y a 25 cm de profundidad el potencial fluctúa entre 0 a -395 hPa, es decir, entre saturación y próximo a capacidad de campo. El suelo de la pampa a una profundidad de 25 cm tiene una variación del potencial entre 0 a -390 hPa, en tanto que a 15 cm de profundidad solo varía entre 0 y -290 hPa.

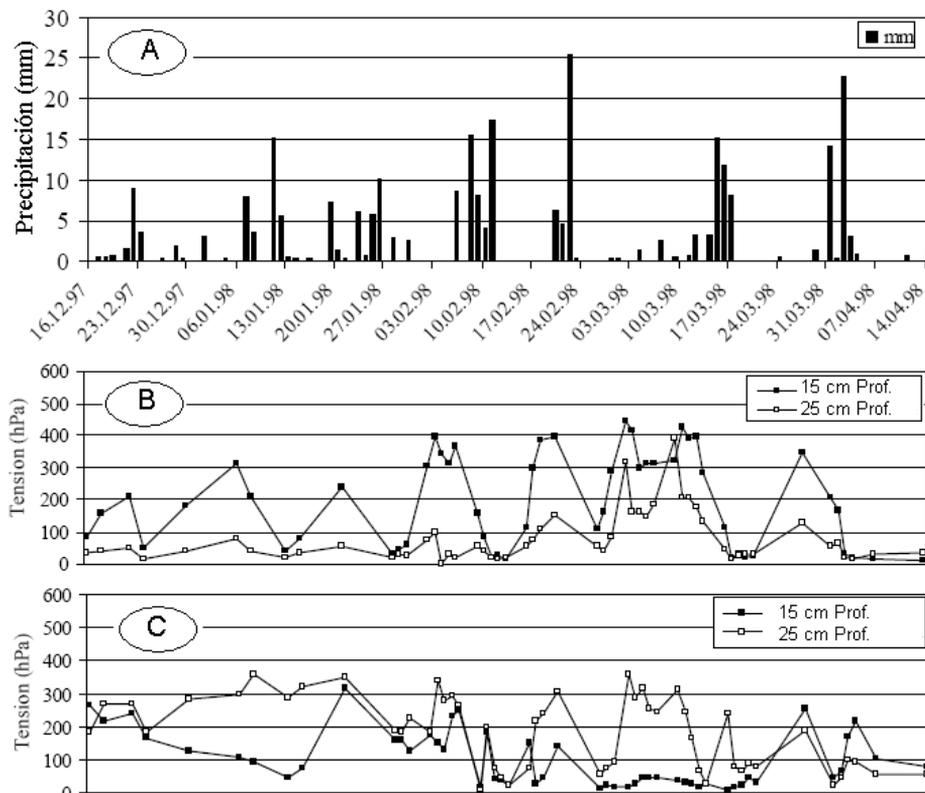


Figura 7. Precipitación (A), tensión del agua en el suelo en el centro de la plataforma de *Suka Kollus* a dos profundidades en el suelo (B) y tensión en el suelo de pampa a las mismas dos profundidades (C) en la zona de Batallas (Stache, 2000)

Los anteriores valores muestran que en los *Suka Kollus* el movimiento del agua se da preferentemente en forma ascendente, a partir de la capa freática; en cambio en los suelos de la pampa el flujo predominante es descendente con una fuerte dependencia de las precipitaciones, lo que se expresa en la gran variabilidad de los valores de potencial, ocurriendo incluso periodos de anegamiento por falta de drenaje.

Colque (2000) señaló que, al comienzo de la estación agrícola, cuando el agua alimenta los canales, el agua se acumula allí rápidamente y empieza a fluir lentamente. Parte del agua penetra al interior de las plataformas, mientras que otra parte deja el sistema a través de percolación profunda, así como del desagüe de los canales.

5. Sistema hidráulico de los *Suka Kollus*.

El régimen hidráulico del sistema de *Suka Kollus* se describe como un sistema de riego subsuperficial y drenaje a través de canales, cuyo objetivo es el de proporcionar la humedad adecuada a los cultivos y drenar el exceso de agua.

Colque (2000) y Yucra (2006) plantean un volumen de control para el balance hídrico en *Suka Kollus* (Figura 8):

$$q_e + p_p = q_s + i + E_{vp} + ET_p \quad (1)$$

donde:

q_e = Caudal de entrada del sistema

p_p = Precipitación

q_s = Caudal de drenaje o salida

i = Percolación

E_{vp} = Evaporación de agua desde los canales

ET_p = Evapotranspiración

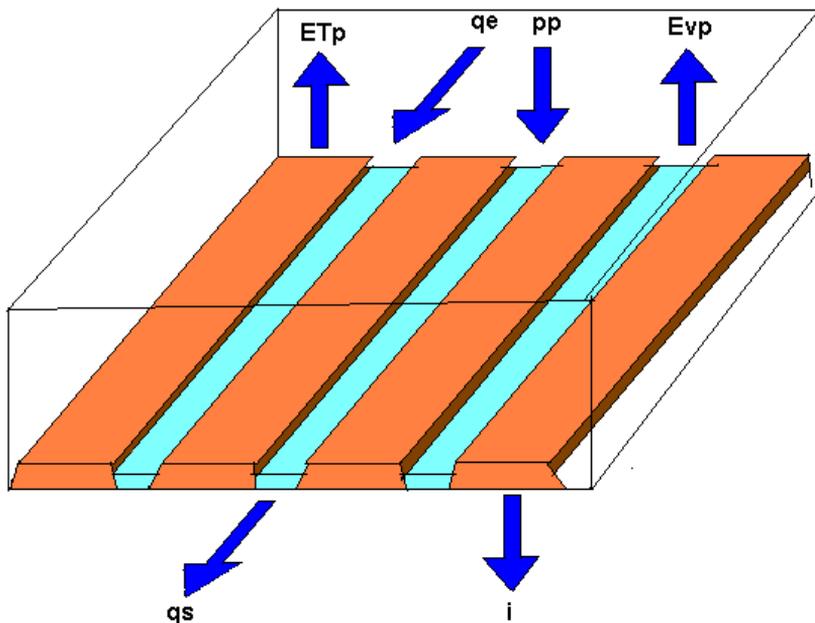


Figura 8. Volumen de control en el sistema de *Suka Kollus* (plataforma + canales) (Chipana et al., 2011)

Otros términos de menor entidad se podrían considerar en el balance anterior tal como el flujo ascendente de agua (entrada al sistema), el flujo horizontal de agua, como entrada o salida, dependiendo del nivel de la capa freática en el sistema, la variación del contenido de humedad del suelo, que será positiva si gana agua o negativa si pierde agua y el movimiento transversal del agua se da desde los canales hacia la plataforma (flujo horizontal de agua), que suministra agua para los cultivos (riego subsuperficial).

6. Mejora del sistema mixto riego-drenaje en *Suka Kollus*. Estudio experimental

El diseño integral del sistema de *Suka Kollus* queda definido en general por cinco dimensiones geométricas: anchura del canal de agua; anchura de la plataforma; altura de la plataforma (profundidad del canal); altura del nivel de agua (calado de agua); anchura y longitud total del sistema; y un parámetro hidráulico: caudal de alimentación mínimo (Yucra, 2006).

La gran limitación de los *Suka Kollus* es la reducida anchura de las plataformas que impide su mecanización y dificulta el resto de las labores agrícolas. En los *Suka Kollus* que se encuentran a orillas del Lago Titicaca, donde la capa freática se encuentra cerca de la superficie del suelo, la principal función de este agroecosistema es el drenaje del exceso de agua. En estas zonas es posible incrementar la anchura de las plataformas, y en consecuencia el área de cultivos, mediante la introducción del drenaje subsuperficial a través de tuberías perforadas de PVC (Figura 9). De este modo, algunos canales de drenaje son reemplazados por tubos de drenaje subsuperficial rellenando los huecos de los canales con suelo.

Alrededor del tubo de PVC se coloca arena gruesa como envoltura, facilitando de esta manera la entrada de agua y evitando su colmatación.

El trabajo de campo se llevó a cabo en el Centro Experimental de Kallutaca, localizado 30 km al sureste de la Ciudad de la Paz en la región de Laja, provincia de los Andes, Bolivia (16°31'10S, 68°19'05W, altitud 3892 m). El área de estudio se encontraba en tierras bajas, propensas a inundaciones, donde predomina la vegetación nativa. La cli-

matología local es típicamente semiárida y fría con una precipitación media anual de 600 mm, siendo diciembre y enero los meses más húmedos del año. La temperatura media anual es de 7,1 °C. Las temperaturas más bajas extremas tienen lugar entre junio y julio con mínimas de -11°C con máximas registradas en los meses de noviembre y diciembre con valores de 22°C. La humedad relativa media anual es 53% (Serrano-Coronel et al, 2018).

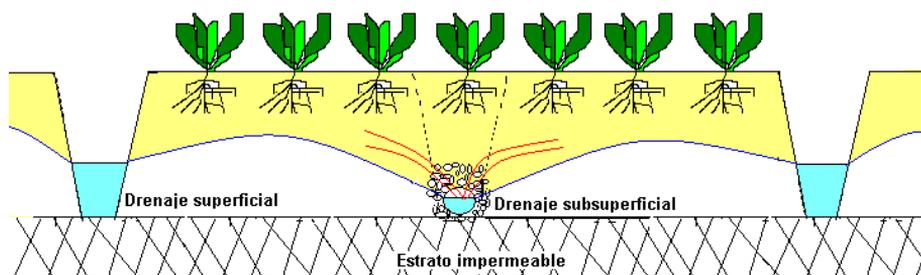


Figura 9. *Suka Kollus* con un sistema mixto de drenaje superficial y subsuperficial (Chipana et al., 2011)

El cultivo sembrado en las plataformas fue una especie nativa de patata 'milla negra' (*Solanum tuberosum* ssp. *andigena*) debido a las bajas temperaturas existentes en el área de estudio. La duración del periodo de cultivo fue de 135 días, desde el 30 de noviembre hasta el 11 de abril de 2010, durante el cual se registraron 272,4 mm de lluvia y 8 días con heladas.

Se ensayaron cuatro tratamientos con diferentes anchuras de las plataformas: T1 (control) en el que solo hay canales de drenaje; T2 en el que se reemplaza un canal por un dren; T3 cuando dos canales se sustituyen por drenes y T4 si tres canales se cambian por drenes (ver figura 10). No se consideraron un mayor número de drenes ya que se dificultaría el riego subsuperficial de las zonas de las plataformas más alejadas de los canales. La tubería de drenaje es de PVC con un diámetro de 100 mm con agujeros de 1 cm perforados en su parte superior.

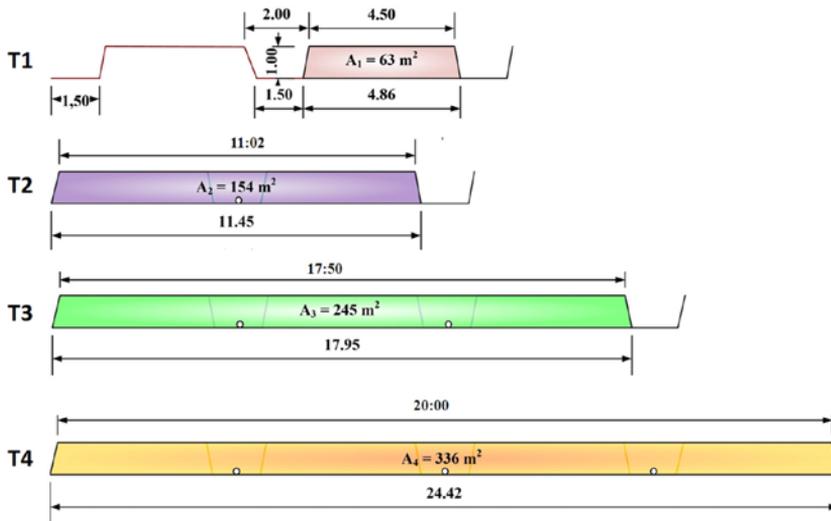


Figura 10. Sección transversal en la que se muestra el drenaje y las dimensiones de cada tratamiento (Serrano-Coronel et al., 2018)

La figura 11 muestra la disposición de los diferentes tratamientos en el campo con dos unidades, esto es, dos repeticiones por cada tratamiento, resultando en un total de 12 líneas de drenaje subsuperficial para el experimento completo. Todas las plataformas tienen una longitud de 14 m.

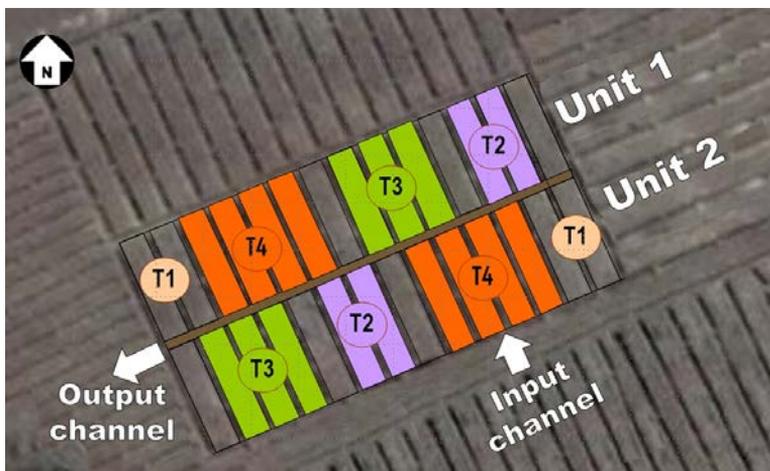


Figura 11. Localización de los tratamientos dentro del área de estudio (no a escala) (Serrano-Coronel et., 2018). Input channel: canal de entrada; output channel: canal de salida.

En la figura 12 se muestra la disposición de los drenes dentro de la plataforma. Se localizan a 1,2 m bajo la superficie del suelo y a 1,8 m sobre la capa impermeable. La distancia entre drenes se calcula para dejar un espacio libre para el desarrollo de las raíces de 0,6 m en el punto más desfavorable.

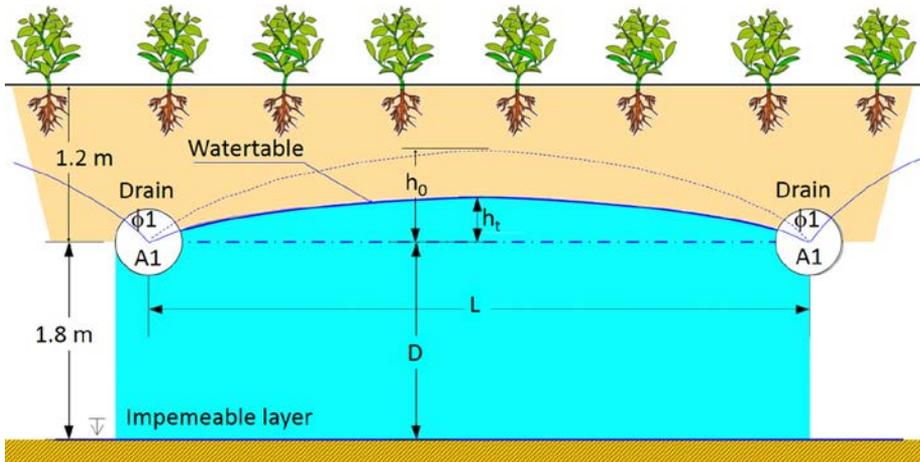


Figura 12. Diagrama geométrico del drenaje (Serrano-Coronel et al., 2018). Watertable: capa freática; Impermeable layer: capa impermeable; Drain: dren

Aplicando la ecuación de Glover- Dumm (Ritzema, 1994) teniendo en cuenta las características hidrofísicas del suelo, se obtiene que la distancia entre drenes varía entre 14,16 m para las condiciones del estrato más favorables y 10,06 m para las condiciones medias entre todos los estratos. En ambos casos sin usar drenes subsuperficiales intermedios. Estos valores son más elevados que los 6,5 m entre canales de drenaje comúnmente usados en los *Suka Kollus* tradicionales. Por lo tanto, es posible expandir el área de las plataformas incorporando drenes subsuperficiales separados entre 10 y 14 m (ver figura 10).

Los resultados también demuestran que las necesidades de agua del cultivo son cubiertas, casi con total generalidad, por los flujos ascendentes en todos los tratamientos. En el caso de periodos en los que las demandas superen dichos flujos ascendentes las plantas usan el agua almacenada procedente de lluvias anteriores.

El rendimiento de patatas alcanzó el valor más alto en el tratamiento T3 (11,3 t/ha) seguido del tratamiento T2 (10,7 t/ha), mientras que las producciones más bajas se registraron en el tratamiento T4 (7,3 t/ha) inferior incluso al rendimiento del tratamiento control T1 (8,3 t/ha). Tanto en la altura de las plantas como en el número de tubérculos por planta no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

7. Conclusiones

Los *suka kollus* son una tecnología ancestral que fue utilizada durante más de mil años para la producción de alimentos de civilizaciones precolombinas, puesto que permiten mitigar los efectos de las heladas a través del incremento de la temperatura en la zona del follaje entre 0,5 a 2 °C. Asimismo, el riego en *suka kollus* se da mediante el flujo ascendente de agua desde la capa freática hacia la zona radicular (riego subsuperficial), siendo la evacuación del exceso de agua otra función importante, principalmente de los *suka kollus* ubicados en zonas bajas con niveles freáticos cercanos a la superficie.

Para reducir el área de canales e incrementar la superficie neta de cultivo es factible la implementación de sistema mixto de drenaje (subsuperficial y superficial).

El rendimiento de papa más elevado se obtuvo en el tratamiento con dos drenes subsuperficiales seguido por el tratamiento con un dren. Esto puede deberse o a un mejor suministro de agua desde la capa freática o a la anchura de la plataforma, que permitió obtener plantas con mayor altura y mayor número de tubérculos por planta comparado con el tratamiento control.

Las necesidades de agua del cultivo de papa fueron cubiertas tanto por los flujos ascendentes desde la capa freática como por la precipitación lo que muestra que el sistema de *Suka Kollus* es sostenible bajo las actuales condiciones climáticas. Las producciones obtenidas pueden considerarse aceptables teniendo en cuenta que se cultivaron en suelos marginales e inundables.

La distancia de 6,5 m entre canales de drenaje, habitualmente usada en *Suka Kollus* tradicionales, es menor que las distancias calcula-

das al interponer drenes subsuperficiales, de 10 a 14 m, por lo que es posible expandir el área de las plataformas.

En consecuencia, los *Suka Kollus* podrían ser una forma valiosa de usar suelos marginales para cultivar, pudiéndose doblar la anchura de las plataformas de cultivo si algunos canales de drenaje son reemplazados por drenes subsuperficiales.

Bibliografía

- Chipana-Rivera, R. 2008. La tecnología de los suka kollus: un agroecosistema ancestral. En: Suka kollus, una tecnología ancestral para el tiempo actual. Prosuco, Cosude, Intercooperation (Eds). La Paz, Bolivia. pp: 95-264.
- Chipana Rivera, R.; Bosque Sánchez, h.; del Pino García, J.L.; Roldán Cañas, J.; Moreno Pérez, M. F. 2011. Sistemas de riego prehispánicos en Bolivia. En: Roldán Cañas, J; Chipana Rivera, R. (coord.): «Sistemas ancestrales de riego a ambos lados del Atlántico». Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba, pp: 3-61
- Colque, H. V., 2000. Balance hídrico en el sistema de riego a través de campos elevados (suka kollus). Tesis de Grado, Escuela Militar de Ingeniería Mariscal Antonio José de Sucre-Bolivia. 234 p.
- Erickson, C.L. 1992. Prehistoric landscape management in the Andean Highlands: raised field agriculture and its environmental impact. *Popul. Environ.* 3: 215-232
- Erickson, C.L., 2006. El valor actual de los camellones de cultivo precolombinos. Experiencias del Perú y Bolivia. En *Agricultura ancestral. Camellones y albarradas: Contexto social, usos y retos del pasado y del presente*. Quito-Ecuador. pp: 315-339.
- Huanca, P. R., 1996. Estudio microclimático de los suka kollu y su influencia en la protección contra heladas. Tesis de Grado, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz-Bolivia. 146 pp.
- Kolata, A. L. y C. Ortloff, 1989. Thermal analysis of Tiwanaku raised fields in the Lake Titicaca basin of Bolivia. *Journal of Archaeological Science*, 16: 233-263.
- Lhome, J. P. y J. J. Vacher, 2003. La Mitigación de heladas en los camellones del Altiplano Boliviano. *Bull. Inst. Fr. Études Andines*. 32 (2): 377-399.

- Morales, E. 2008. Efectos de los suka kollus en la productividad de la papa en el altiplano norte. *Revista de Agricultura* 60(43):16-20.
- Nakajima, N. 2004. Los experimentos de suka kollu: potencialidad y realidad. La Paz-Bolivia. 6 pp.
- Ortloff, C.R. 1999. Urban water supply and agricultural systems in the early centuries BC and AC: comparison of old (Roman and Hellenistic) and new world (South American Chimu, Tiwanaku) hydraulic technologies. Seventeenth Congress of International Commission on Irrigation and Drainage. History Seminar; R.3 25-36
- Oyuela-Caycedo, A. 2008. Late pre-Hispanic chiefdoms of Northern Colombia and the formation of anthropogenic landscapes. En: H. Silverman and W. Isbell. «The Handbook of South American Archaeology», pp: 405-428. DOI:10.1007/978-0-387-74907-5
- Parsons, J.J.; Denevan, W.M. 1967. Pre-Columbian ridged fields. *Scientific American*, 127(1): 92-101
- Posada-Restrepo, W.A.; Cadena-Duarte, B.; González-Severiche, C.; Arroyave-Flórez, E.2019. El sistema de canales y camellones prehispánico del golfo de Urabá, noroccidente de Colombia. Un reporte arqueológico y geográfico preliminar. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 43(169):628-637. doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.856>
- Renard, D.; Iriarte, J.; Birk, J.J.; Rostain, S.; Glaser, B.; Mckey, D. 2012. Ecological engineers ahead of their time: The functioning of pre-Columbian raised-field agriculture and its potential contributions to sustainability today. *Ecological Engineering*, 45: 30-44. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.007
- Ritzema, H.P., 1994. Subsurface flow to drains. In: Ritzema, H. (Ed.), *Drainage Principles and Practices* 16. Int. Inst. For Land Rec. and Imp. Publ., Wageningen, The Netherlands, pp. 263–303.
- Rodrigues, L.; Lombardo, U.; Trauerstein, M.; Huber, P.; Mohr, S. Veit, H. 2016. An insight into pre-Columbian raised fields: the case of San Borja, Bolivian lowlands. *Soil*, 2: 367-389. doi:10.5194/soil-2-367-2016.
- Sanchez de Lozada, D.; P. Baveye, y S. Riha, 1998. Heat and moisture dynamics in raised field systems of the Lake Titicaca region (Bolivia). *Agricultural and Forest Meteorology*. 92: 251-265.
- Serrano-Coronel, G.; Chipana-Rivera, R.; Moreno-Pérez, M.F.; Roldán-Cañas, J. 2018. Study of vertical water flows contribution to the crop

water consumption in *suka kollus* using a mixed drainage system. *Agricultural Water Management*, 206: 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.003>

Stache, A., 2000 Konventionelle Landnutzung und traditionelle Hochbeete (Suka Kollus) am Titicacasee. Bolivien: Agrarökologische Standortbedingungen im Vergleich. Cottingen: Georg-August-Universität. Ph.D. - Dissertation. 92 pp.

Yucra, S. E., 2006. Evaluación de cinco cultivares de papa (*Solanum tuberosum* ssp.) tolerantes a heladas en el comportamiento microclimático de dos agroecosistemas (suka kollus y pampa) en el Altiplano Norte. Tesis de Grado, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz-Bolivia. 150 pp.

Antonio Caballero y Góngora fue un experto en la promoción de una ilustración con ese preciso contenido político de utilizar al Estado como instrumento para promover la prosperidad económica mediante la introducción de la tecnología. Las nuevas técnicas y las aplicaciones prácticas de la ciencia utilizadas a fin del siglo XVIII en Nueva Granada, fomentadas por la Sociedad Económica de Amigos del País fundada en Mompox, se expresaron en la Expedición Botánica y en los programas de reforma de la educación superior, valorando en particular las matemáticas y la física

GARCÍA-ABÁSULO GONZÁLEZ, Antonio, «Antonio Caballero y Góngora, Arzobispo-Virrey de Nueva Granada. El gobernante más coherente y eficaz de Carlos III», en ARANDA DONCEL, J., COSANO MOYANO, J. y PELÁEZ DEL ROSAL, M. (coords.), *Actas del Congreso Internacional “El Arzobispo de Santa Fe, Virrey de Nueva Granada y obispo de Córdoba, Don Antonio Caballero y Góngora y su época”*, Córdoba, 2024, p. 46.

