

OPTIMIZACIÓN DE ÁREAS DE RIEGO EN BASE A HIDROLOGÍA ESTOCÁSTICA Y SISTEMAS HIDROPÓNICOS EN LA COMUNIDAD CENTRO RIVERA, RÍO DESAGUADERO, ALTIPLANO CENTRAL

Optimization of irrigated areas base on hydrology stochastics and hydroponic systems in the community Centro Rivera, Desaguadero river, Altiplano central

Edwin Torrez Soria¹, Hugo Luis Soliz Flores²

RESUMEN

Las condiciones hidrológicas, climáticas y ecológicas observadas en el área de estudio, ubicada en las riberas del río Desaguadero, muestran una baja capacidad productiva. Entre los factores limitantes podemos señalar las temperaturas mínimas y máximas por periodos largos, que tienen directa relación con frecuentes heladas nocturnas, la falta de agua durante algunos meses del año, la elevada tasa de evapotranspiración, la cantidad limitada de nutrientes y materia orgánica en los suelos y la mala calidad de las aguas superficiales y aguas subterráneas. Con el uso software de modelación estocástica y la aplicación de metodologías se comparó dos escenarios futuros para los periodos 2011-2030 y 2046-2065. En estos periodos se muestran que las temperaturas mínimas y máximas se incrementan en promedio de 2 °C en relación al periodo base. Al realizar el análisis piezométrico en los niveles de las aguas subterráneas del área de producción, y de acuerdo a la ubicación se determinó que los piezómetros cercanos al río y canales de riego no presentan variaciones considerables en el nivel freático, pero si los que se encuentran alejados de estas. El RAS es alto indicando alto contenido de sodio llegando a clasificarse como aguas no aptas para el uso en riego. Los resultados obtenidos por ABRO indican que para los escenarios futuros habrá una disminución de 8 hasta 14 hectáreas en relación al escenario base. En base a estos resultados se planteó alternativas de producción para zonas semiáridas, el forraje verde hidropónico (FVH). La producción de forraje verde hidropónico comparado con sistemas tradicionales permite el ahorro de 50 % de agua en un sistema en el que se usó 5 kg de semillas/m², con bandejas de 0,50 x 1 m, en dos

estantes de 4 filas con capacidad de producción de 96 bandejas. En este sistema se pretende producir hasta 50 kg por día de forraje verde en un área total de 48 m². Bajo este sistema de producción en un año se puede llegar a obtener 18250 kg de forraje fresco, comparado con la producción de 2 hectáreas de alfalfa a campo abierto que tiene un rendimiento de 5880 kg ha⁻¹ en solo dos cortes. Por lo tanto, la producción de forraje verde hidropónico equivaldría a 6 hectáreas de superficie a campo abierto.

Palabras clave: Hidrología estocástica, Forraje verde hidropónico, Salinidad, Conductividad eléctrica, RAS.

ABSTRACT

Hydrological, climatic and ecological conditions observed in the study area, located on the shores of Desaguadero river, show low productive capacity. Among the limiting factors we can point out the minimum and maximum temperatures for long periods, which are directly related to frequent frost nights, lack of water for several months, high rate of evapotranspiration, limited amount of nutrients and organic matter soils and poor quality of surface water and groundwater. Using a stochastic modeling software and application of methodologies, two future scenarios were compared; the periods were 2011-2030 and 2046-2065. Throughout these periods, the minimum and maximum average temperatures increase around 2 °C related to the base period. For piezometric analysis, the levels of groundwater in the agricultural area and according to the location, it was seen that regions close to the river and irrigation canals there is no considerable variations in the water table, but the variation is getting more and more if the piezometer is far away from these. Chemical analysis of water indicate that SAR is high, which indicates high sodium content; that led to classify them as unfit for use in irrigation. The results obtained of ABRO indicated that in future

1 Maestrante del programa de Riegos de la Facultad de Agronomía-Universidad Mayor de San Andrés.

2 Docente de Drenaje Agrícola (Hidrogeología) – Programa de Maestría en Ingeniería de Riegos.

scenarios there will be a decrease of 8-14 hectares of agricultural area in relation to the baseline scenario. Based on the obtained results, it was set a production alternative for semi-arid areas, the hydroponic forage (FVH for its acronyms in Spanish). The Hydroponic forage compared to traditional systems allows saving around 50% of water in a system where 5 kg of seeds m^{-2} was used, with trays of 0,50 x 1 m, in two shelves of four rows with a total production capacity of 96 trays. This system intended to produce up to 50 kg per day of green fodder in a total area of 48 m^2 . Under this system of production during a year, there is a production around 18250 kg of fresh forage, compared with alfalfa production of 2 hectares in a open field which has 5880 kg ha^{-1} yield of in just two cuts. Therefore, the production of hydroponic forage is equivalent to 6 hectares in the open field. Under these criteria, it was set the optimization of irrigated areas, efficient water use for production, and also reuse of saline water in hydroponic systems, those are excellent opportunities for these arid areas.

Keywords: Stochastic hydrology, Hydroponic forage, Salinity, Electrical conductivity, SAR.

INTRODUCCIÓN

Las difíciles condiciones climáticas y ecológicas existentes en las regiones altas de Bolivia han determinado una baja capacidad productiva en esta zona. Entre los principales factores limitantes debemos mencionar la falta de agua durante varios meses del año, las frecuentes heladas nocturnas y la cantidad limitada de nutrientes y materia orgánica en los suelos. Todos estos factores se reflejan en una cobertura pobre y una escasa y riesgosa producción agrícola (Morales, 1994). La pérdida casi única y mayor del recurso agua se da por medio de una alta evaporación en los meses de octubre, noviembre y diciembre con valores de 4,45; 4,76 y 4,59 $mm\ día^{-1}$ respectivamente. Esta condición limita el aprovechamiento de este importante recurso por parte de la población local y por ende el desarrollo de la región. Además se suma la afirmación de que los cambios climáticos globales podrían crear una desigualdad más severa en la distribución de los recursos hídricos en el tiempo y espacio. Consecuentemente, los esfuerzos deben contemplar un manejo adecuado y sostenible del agua para asegurar su permanencia y constancia en la región (Rocha, 2008).

Los riesgos de salinización y/o sodificación de los suelos ligados al riego, según Ledezma, et al. (1995) y los estudios realizados en la zona baja de la provincia Villarroel muestran que el riego por gravedad aplicado en la región permite la producción de cultivos de alfalfa (*Medicago sativa*

L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), haba (*Vicia faba* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.) y quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). Sin embargo, se tiene un riesgo alto a la salinización, en estos estudios se ponen a consideración dos aspectos favorables como ser el tipo de riego aplicado es suplementario y los cultivos producidos son tolerantes a ciertos niveles de salinidad.

El forraje verde hidropónico (FVH), es una metodología de producción de alimento para el ganado que resulta propicia para evadir las principales dificultades encontradas en zonas áridas y semiáridas para la producción convencional de forraje. Las zonas áridas han sido consideradas como terrenos marginales para el desarrollo del sector agropecuario, siendo las razones principales para esta consideración la escasez permanente de lluvia, alta evaporación, suelos y aguas de riego de baja calidad. Consecuentemente, la búsqueda de metodologías alternativas de producción de forraje en las cuales se considere el ahorro de agua, altos rendimientos por m^2 ocupado, calidad nutricional, flexibilidad en la transferencia y mínimos impactos negativos sobre el medio ambiente es de particular importancia. Considerando los puntos anteriores, se puede decir que el método FVH puede constituirse en una opción alternativa a los métodos convencionales de producción de forraje que contribuya a una actividad agropecuaria sostenible en zonas áridas y semiáridas (López-Aguilar, 2008). El objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar las características agroclimáticas, hidrológicas del sistema productivo en la comunidad de Centro Rivera, río desaguadero del departamento de La Paz, a través de la modelación estocástica con enfoque a los cambios climáticos, y el diseño de técnicas de producción como son los cultivos hidropónicos específicamente el forraje verde hidropónico para la optimización de áreas de riego en zonas con riesgo de salinización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende la comunidad de Centro Rivera, ubicada en las laderas del río Desaguadero, Municipio de Papel Pampa, Noreste de la provincia Gualberto Villarroel del departamento de La Paz. Esta región pertenece a la cuenca del río Desaguadero central, que a su vez se encuentra en la gran cuenca cerrada del Altiplano boliviano, geográficamente situada entre las coordenadas 17°33'12,94" y 17°34'59,07" latitud sur y 67°42'12,38" y 67°40'52,72" longitud oeste, con alturas promedio de 3800 msnm.

Para el trabajo se emplearon software especializados como ArcGis 10.1, SAMS 2007 modelación

estocástica, LARS-WG5, ABRO 3.1, imágenes satelitales y base de datos hidroclimáticos de la estación de Patacamaya. En base a las imágenes satelitales georeferenciadas (tipo Landsat-TM 3, 4, 5) incluyendo el río Desaguadero se realizó el relevamiento de información sobre la ubicación de la comunidad. Fueron incluidas las vías de acceso, obras de toma, áreas bajo riego, áreas de producción a secano, canales de riego y la ubicación de los piezómetros todo esto en base a series de variables hidrológicas y climáticas de datos existentes del SENAMHI y trabajos de investigación realizados en la zona de estudio e información obtenida por la UMSA-IHH. Paralelamente se obtuvieron datos geográficos de la cuenca del río Desaguadero, toda la información recabada ha sido utilizada para la determinación de caudales de las microcuencas de los ríos adyacentes ya que la mayoría de estos no cuentan con la información suficiente.

En las áreas de cultivo bajo riego se realizó el diseño para implementar la red de monitoreo de aguas subterráneas a través de piezómetros instalados manualmente y así coleccionar la mayor información posible. La disposición de los piezómetros fue analizada y una vez determinada la cantidad y profundidad la red de piezómetros fue realizada su implementación utilizando equipos de perforación manual como barrenos (han augers), contruidos de acero de alta resistencia de 3/4" de grosor, cabeza de perforación de 2" y 2.5" de diámetro y con 1 metro de longitud cada uno de sus 6 partes (6 metros en total).

En la zona de estudio, se obtuvieron 8 muestras de agua: uno en los canales de riego, seis en los piezómetros instalados y uno en un pozo de agua para consumo ubicado a una profundidad de 20 metros en una zona aledaña a las viviendas de los comunarios. Envases de 1 litro fueron usados para transportar la muestra al laboratorio. También fue empleado un equipo portátil multi parámetro para la medición de parámetro físico-químicos in situ (OAKTOM PC 650 con kit de calibración y pizetas con agua destilada), papel de limpieza, guantes y conservadora con hielo del lugar para la conservación y transporte de las muestras al laboratorio. Las muestras para análisis químicos fueron obtenidas en la época seca (septiembre 2013) de acuerdo a los protocolos de muestreo recomendados por Nielsen, (2005) y Barroso, (2010). Las muestras fueron enviadas al laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología (LCA - UMSA).

Para la modelación estocástica se ha trabajado con la información generada de las series de tiempo

hidrológicas como es el caudal histórico. Con estos caudales se ha reproducido las estadísticas históricas para los periodos 1966-1989 y 2003-2009. Seguidamente y de acuerdo a los pasos indicados se ha verificado los parámetros del modelo con la finalidad de comprobar si el modelo representa razonablemente bien el proceso bajo consideración, y así finalmente llevar a cabo el estudio de simulación para el mencionado periodo.

Para los dos escenarios futuros (A2 y B1) se considerara la media de datos generados a través de la modelación estocástica con el modelo LARS-WG5 con dos series de tiempo. La primera para el periodo 2011-2030 y la segunda para el 2046-2065. Los escenarios futuros recomendados por el IPCC como son el A2 y B1. Los datos generados para ambos escenarios fueron introducidos a ABRO 3.1 para determinar la Evapotranspiración de referencia (ET_o) en el área en estudio y así comparar bajo estas condiciones el área bajo riego que puede optimizarse. Asimismo, bajo estos criterios se plantea la implementación de los cultivos hidropónicos, específicamente el forraje verde hidropónico como una alternativa que permita ahorrar el consumo de agua y el área de producción bajo condiciones hidro-climáticas cada vez más adversas.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las dos áreas principales y potenciales de riego abarcan una área total de 457 ha bajo riego y un área de 240 ha. Cabe señalar que el área regable es menor al indicado ya que la producción está en función del tipo de cultivo y la planificación que tiene cada familia. Se logró identificar 7 canales de riego en el área de influencia de la comunidad, que actualmente se encuentran en funcionamiento, sin embargo el canal 1 (Canal Principal) es el que abarca la mayor área de riego para la comunidad, atravesando dos áreas de riego y es la que, según los habitantes de la comunidad, se emplea desde hace más de 30 años atrás. Asimismo en estos últimos años se han habilitado los otros seis canales por la alta demanda de agua por parte de los cultivos en la comunidad, estos se encuentran interconectados con el canal principal.

La comunidad Centro Rivera, presenta un clima propio de la zona del Altiplano Boliviano, debido a que se encuentra en la zona tropical pero a una altura mayor a los 3600 msnm. Los efectos de la variación altitudinal (3600 a 5700 msnm) y tomando el gradiente térmico altitudinal, se encuentran comprendidas entre los 20 a 24,6 °C durante el día y con valores de -6,4 a -9,6 °C durante la noche.

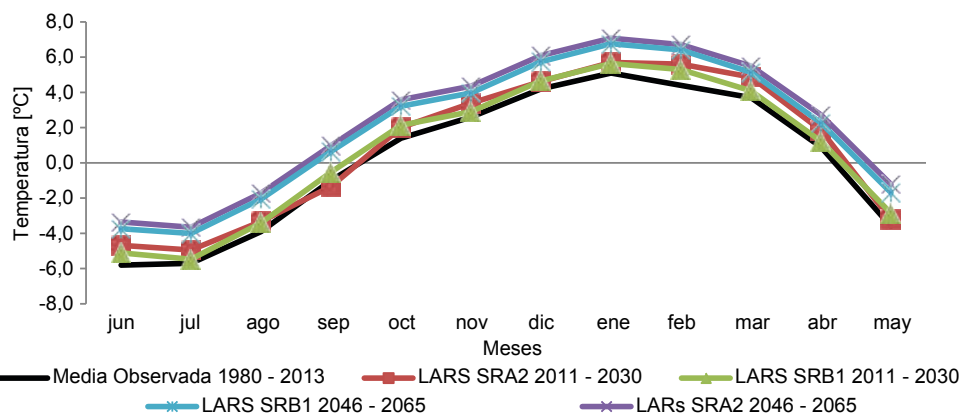


Figura 1. Comparación de temperaturas medias mínimas observadas para el periodo 1980 - 2013 y la tendencia observada y obtenida a través de la modelación estocástica para el periodo 2011 - 2030 y 2046 - 2065, bajo los escenarios A2 y B1 de cambio climático.

Los periodos secos (mayo a octubre) presentan una variación mínima respecto de las temperaturas mínimas (Figura 1). Sin embargo, durante la época húmeda (noviembre a abril) se evidencia una mayor variación, y es similar para ambos escenarios no existiendo variación entre

los modelos A2 y B1 sobre cambio climático, lo que nos lleva a inferir que la producción agrícola se podría ver afectada debido a la reducción en la precipitación como se puede observar en la Figura 3 en los años modelados a través de la simulación estocástica.

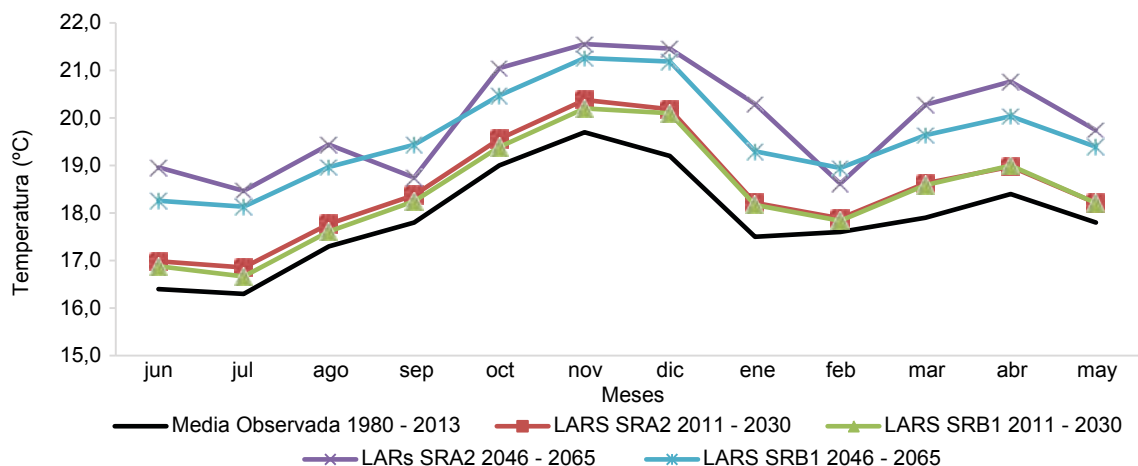


Figura 2. Se puede ver la comparación de temperaturas medias máximas observadas para el periodo 1980 - 2013 y la tendencia obtenida a través de la modelación estocástica para el periodo 2011 - 2030 y 2046 - 2065, bajo los escenarios A2 y B1 de cambio climático.

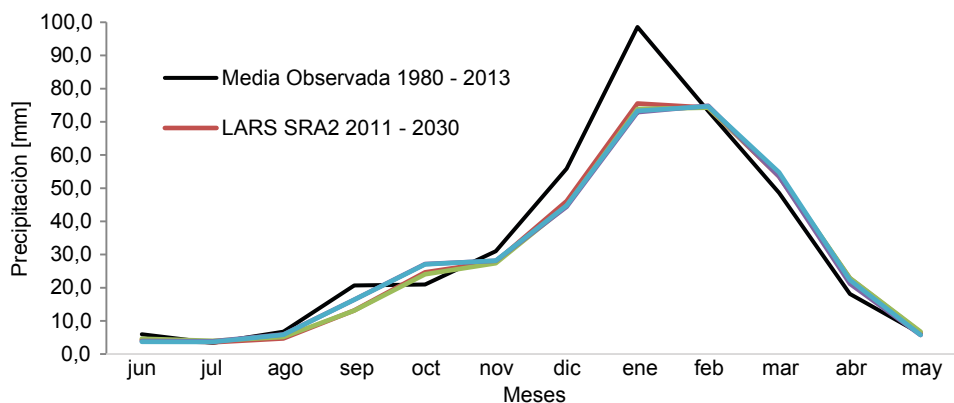


Figura 3. La figura muestra las precipitaciones observadas para el periodo 1980 - 2013 y las temperaturas generadas para los periodos 2011-2030 y 2046 - 2065, bajo los escenarios A2 y B1 de cambio climático.

A través de la determinación de los hidrogramas mensuales se realizó una comparación entre las estaciones de Ulloma y Chuquiña (Figura 4 y 5),

cercanas al área del proyecto lo que permitió determinar el volumen aprovechado por el sistema de riego en la comunidad de Centro Rivera.

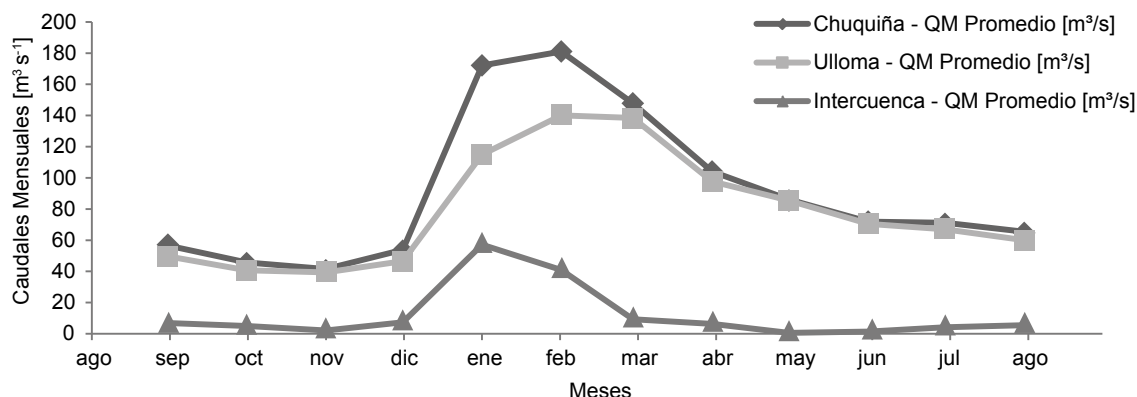


Figura 4. Comparación de caudales mensuales medios del periodo 1966 - 1989 entre las estaciones de Ulloma y Chuquiña (Río Desaguadero).

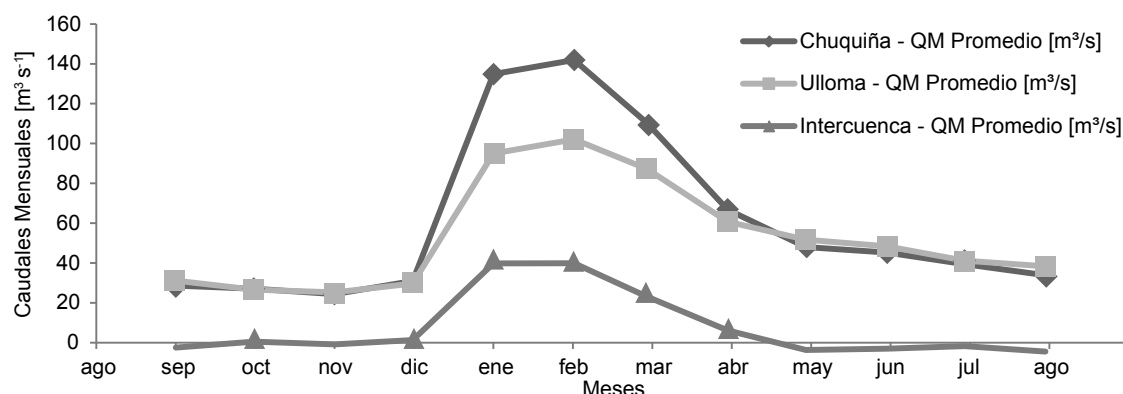


Figura 5. Comparación de caudales medios mensuales para el periodo 2003 - 2009, estaciones de Ulloma y Chuquiña (Río Desaguadero)

Debemos señalar que en el área de estudio, de acuerdo a la verificación realizada en campo, se ha obtenido la información sobre la actividad ganadera la misma está detallada en la Tabla 1, la misma está compuesta por ovinos, vacunos,

porcinos y aves menores, en menor proporción, de las cuales se ha podido determinar que la crianza de ovinos es a la que mayor dedicación le prestan por los ingresos que le representan a las familias productoras.

Tabla 1. Producción pecuaria de acuerdo a las especies, número de cabezas por familias y el precio referencial en bolivianos para el año 2013.

Especie	Nº cabezas/familia	Precio/cabeza (Bs)
Ovino (mejorado)	150	250 (de 1 año)
Vacuno	8	3500 (de 1 año)
Cerdo	7	1000 (de 1 año)
Gallina	8	Autoconsumo

Dentro del área de estudio y la comunidad Centro Rivera, se han identificado 2 tipos de producción, los cultivos a temporal y los cultivos bajo riego. Las especies agrícolas más cultivadas se muestran en la Tabla 2 y 3. Por el tipo de producción debemos señalar que el destino de la producción a secano está normalmente dirigido al autoconsumo siendo muy bajo el porcentaje que se destina a los

mercados, asimismo el área total de producción a secano llega a ser de 113,75 ha de acuerdo a la información recopilada en campo. Asimismo la producción bajo riego alcanza a 385 ha de las cuales el mayor porcentaje se da a los forrajes como principal fuente de alimentos para el ganado ovino, vacuno con el que cuentan las familias de la comunidad Centro Rivera.

Tabla 2. Cultivos a temporal en la comunidad de Centro Rivera, principales cultivos según su orden de importancia.

Cultivos	Área (ha)	Mes Siembra	Mes Cosecha	Rend. (t ha ⁻¹)
Papa	47,5	Oct y Nov	Abr, May, Jun y Jul	1,84
Quinua	42,5	Oct y Nov	Abr, May y Jun	0,46
Cañahua	23,75	Nov y Dic	Abr, May y Jun	0,276
Total	113,75			

La tabla 2 muestra los tres cultivos principales que son cultivados en la comunidad, asimismo se observa el área, la época de siembra y

cosecha, así como el rendimiento en toneladas por hectárea que llegan a obtener en la comunidad.

Tabla 3. Cultivos bajo riego (Cultivos de mayor importancia por superficie).

Cultivos	Área(ha)	Mes Siembra	Mes Cosecha	Rend.(t ha ⁻¹)
Alfalfa *	200	Sep, Oct, Nov, Dic	Abr y May	1,47
Cebada	55	Sep, Nov y Dic	Abr, May y Jun	1,38
Avena	40	Nov y Oct	Abr, May, Jun y Jul	1
Papa	35	Sep, Oct y Nov	Abr, May, Jun y Jul	2,76
Haba	35	Ag y Sept	Abr, May y Jun	0,92
Quinua	20	Ag y Sept	Abr, May y Jun	0,5
Total	385			

* Cultivo plurianual, se realiza de tres a cuatro cortes por año, el rendimiento mostrado es por corte.

El área que se emplea para la producción tanto a secano como bajo riego alcanza a un total de 498.75 ha, que llega a ser el área potencial de producción que se tiene en la zona.

Los rendimientos obtenidos para el caso de los forrajes son la alfalfa 1.47 t ha⁻¹, cebada 1.38 t ha⁻¹ y avena 1 t ha⁻¹ en un ciclo de producción que varía entre los 6 a 7 meses, los cuales son destinados para el ganado ovino y vacuno principalmente. Toda la información obtenida ha sido introducida al software ABRO 3.1, mismo que nos ha permitido determinar el área bajo riego óptimo para el área de estudio. En la Tabla 4 se observa los resultados obtenidos para los escenarios modelados estocásticamente.

Tabla 4. Comparación de los valores obtenidos a través del ABRO, para el escenario actual (real) en relación a los 2 escenarios futuros para dos periodos analizados.

Escenarios	Área Bajo Riego Óptimo (Ha.)
Periodo 1980 – 2013	199,11
Escenario SRA2 2011 – 2030	191,87
Escenario SRB1 2011 – 2030	191,31
Escenario SRA2 2046 – 2065	185,01
Escenario SRB1 2046 – 2065	186,36

Los resultados obtenidos a través del software ABRO, muestra la disminución del área bajo riego

óptimo, en relación a los escenarios futuros para el periodo 2011-2030 y 2046-2065, se observa una pérdida de 8 a 14 hectáreas respectivamente, las cuales se puede atribuir a las condiciones climáticas generadas para dichos periodos.

También se ha realizado el análisis de niveles piezométricos como podemos describir; la recuperación de niveles en los piezómetros, profundos, especialmente los alejados de la ribera del río (zona de recarga), tardó entre 1 a 2 días en alcanzar el estado original del nivel freático, en muchos casos niveles de saturación completa (100%). En la Figura 6 se muestra un resumen de los datos monitoreados en el tiempo de evaluación.

La poca fluctuación de niveles registrada en la mayoría de los piezómetros someros es debido a su ubicación, por ejemplo, en la zona de recarga (a las orillas del río Desaguadero). También se deduce que el área de riego en esta zona mantenga condiciones altas de saturación (100%) durante la mayor parte del año por: 1) Al ser pozos de 4 metros de profundidad, 2) Tener recuperación casi inmediata, 3) Litológicamente constituidos en toda su estructura por la capa arcillo arenosa y 4) Conductividades hidráulicas con dos órdenes de magnitud mayores a las de los pozos profundos.

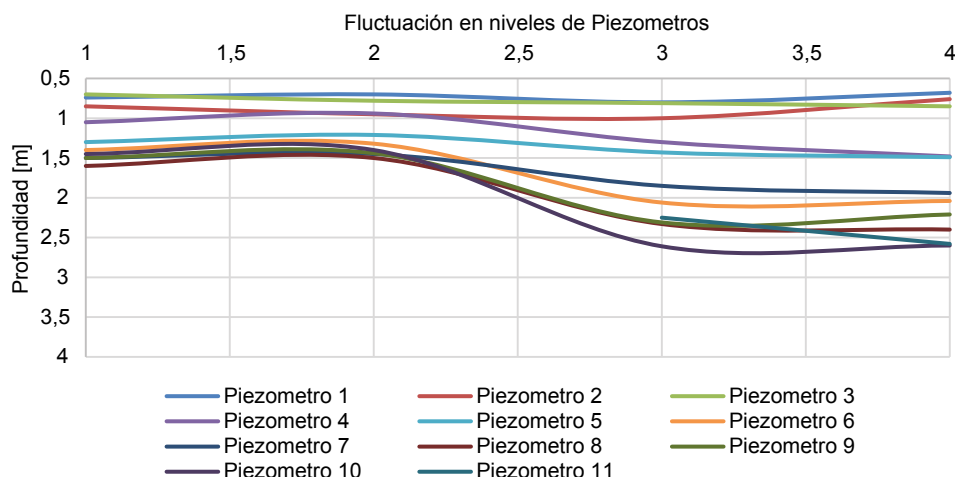


Figura 6. Fluctuación de niveles en piezómetros instalados, periodo de evaluación de 7 semanas.

En relación con la CE (Conductividad eléctrica), para la clasificación del agua vamos a considerar los siguientes grupos:

Grupo C1: CE entre 0,10 y 0,25 dS/m. Agua de “Baja salinidad”, apta para el riego de cualquier cultivo, en cualquier tipo de suelo, con baja o nula probabilidad de generar salinidad en los suelos.

Grupo C2: CE entre 0,25 y 0,75 dS/m. Este tipo de aguas se consideran como de “Salinidad media”; pueden usarse para el riego de cultivos, a condición de que exista cuando menos, un lavado moderado de los suelos. La mayoría de los cultivos, resisten esta agua, sin prácticas especiales de control.

Grupo C3: CE entre 0,75 y 2,25 dS/m. Este tipo de aguas se consideran como de “Salinidad alta” y solamente deben usarse en suelos con buen drenaje y en cultivos resistentes a las sales.

Grupo C4: CE entre 2,25 y 4,00 dS/m. Este tipo de aguas se consideran como “Salinidad muy alta” y en muchos casos no son recomendables para riego. Solo deben usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso. Solo para cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Grupo C5: CE entre 4,00 y 6,00 dS/m. Agua de “Salinidad excesiva”. Solo debe usarse en casos muy especiales, extremando las precauciones.

Grupo C6: CE entre 6,00 y 10,00. Agua no aconsejable para el riego en ningún caso.

La importancia del medir el RAS radica en que el ion sodio tiene por característica una fuerte tendencia a desestabilizar la estructura del suelo, causando anorexia en las plantas. En relación con el valor RAS, podemos señalar que vamos a emplear la siguiente clasificación:

Grupo S1: Valor RAS entre 0 y 10. Son aguas de bajo contenido en sodio, útiles para el riego de la mayoría de suelos y cultivos.

Grupo S2: Valor de RAS entre 10 y 18. Son aguas de mediano contenido en sodio, útiles para el riego de suelos de textura gruesa o de suelos orgánicos con buena permeabilidad.

Grupo S3: Valor RAS entre 18 y 26. Son aguas de alto contenido de sodio, solo aplicables a suelos yesíferos o a suelos con prácticas especiales de manejo. No son útiles para el riego de cultivos altamente sensibles al sodio, como lo son la mayoría de los frutales.

Grupo S4: Valor RAS mayor del 26. Son aguas de muy alto contenido en sodio, prácticamente inadecuadas para el riego de la mayoría de suelos y cultivos.

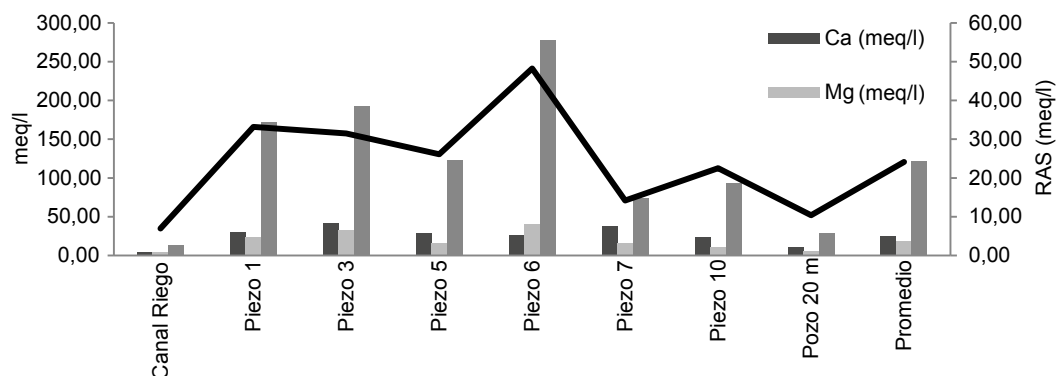


Figura 7. Contenido de Ca, Mg y Na en meq l-1 y la relación de absorción de Sodio (RAS) en canal de riego, piezómetros y pozo profundo

Lacerda, et al. (2010) señala que las estrategias de manejo utilizadas para el cultivo en condiciones de salinidad pueden ser divididas en dos grupos: 1 no específicas y 2 específicas (Lacerda, 2010). Las estrategias específicas son utilizadas en diferentes condiciones de cultivos, y pueden aumentar la productividad y el aprovechamiento de los suelos cuando son condiciones salinas y cuando son condiciones no salinas.

En la producción tradicional actualmente en la comunidad Centro Rivera, se obtiene una producción de alfalfa de 294 toneladas, que están en función del área en producción que es de 200 hectáreas. Asimismo el rendimiento obtenido en la zona es de 1,47 toneladas por hectárea. Los rendimientos reportados son muy bajos y en función a esta planteamos la producción de forraje verde hidropónico en un sistema controlado, ya que en promedio un productor posee alrededor de 2 hectáreas dedicadas a la producción de alfalfa en la región llegando a obtener un rendimiento de 2,94 toneladas en un año o su equivalente a 2940 kg por corte. Regularmente realizan 2 a 3 cortes al año dependiendo de las lluvias. Para fines

comparativos vamos a considerar 2 cortes con los que se llega a obtener de manera tradicional 5880 kg por año de alfalfa verde disponible para el ganado.

El sistema de producción de forraje verde hidropónico propuesto considera 5 kg de semillas por m², de avena forrajera (*Avena sativa*) y/o maíz forrajero (*Zea mays*), es decir se empleará 2.5 kg por ½ m², teniendo en cuenta que las bandejas son de 0,50 x 1 m, las cuales estarán colocadas en dos estantes con capacidad de producción de 24 bandejas cada una como se observa en la Figura 8, haciendo un total de 48 bandejas, donde se pretende producir hasta 50 kg por día de forraje verde en un área efectiva de 12 m², sin embargo como se cuenta con 4 filas de bandejas se abarcará un área de 48 m². Bajo este sistema de producción en un año se puede llegar a obtener 18250 kg de forraje fresco al año. Si comparamos con el área requerida para producir alfalfa en campo abierto como se ha observado que esta producción equivaldría a 6 hectáreas de producción o su equivalente a 60000 m² de superficie en campo abierto.

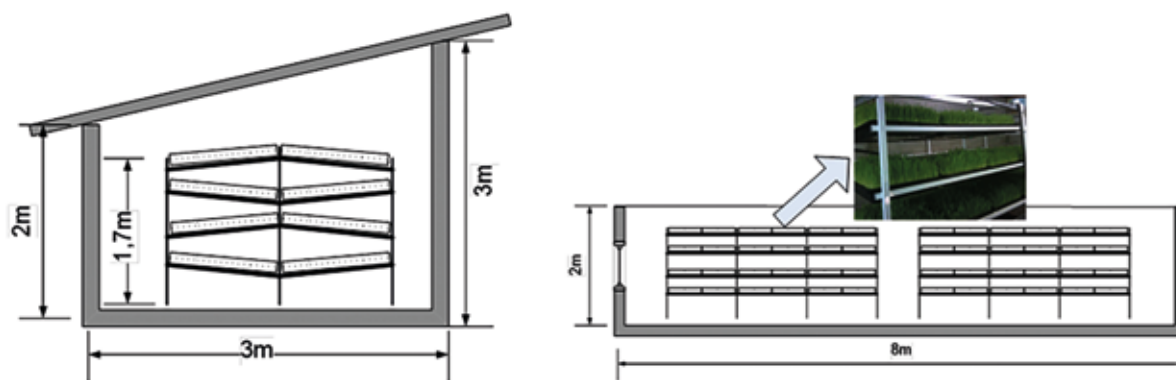


Figura 8. Vista lateral de las dimensiones del ambiente para la producción de Forraje verde hidropónico con 48 bandejas y 4 filas.

Este tipo de sistemas de producción de forraje verde hidropónico llega a utilizar muy poca agua, ya que puede emplearse un sistema de riego automatizado con riegos de 3 a 5 minutos diarios y siendo además reutilizado se ahorra en términos generales hasta un 50 % del agua empleada para la producción de forrajes, asimismo de acuerdo a estudios realizados sobre la producción en campo abierto se requiere alrededor de 300 litros

de agua para producir 1 kg de alfalfa, y 150 litros de agua para producir 1 kilo de maíz forrajero, ya que se llega a tener pérdidas por percolación, escorrentía, evaporación y evapotranspiración. Mientras que para producir 1 kilo de forraje verde hidropónico se puede llegar a emplear desde 2 hasta 4 litros de agua dependiendo del tipo de riego y la reutilización que se le pueda dar al agua dentro del sistema de producción.

Tabla 5. Cuadro comparativo de la producción de alfalfa un sistema tradicional vs Forraje Verde hidropónico de maíz o avena forrajera.

Sistema Tradicional	Sistema Hidropónico
2 hectáreas de alfalfa en producción por familia en promedio	24 m ² , área total de producción
Rendimiento de 1,47 t ha ⁻¹	12 m ² , área real de producción en bandejas (equivalente a 6 ha por año)
En 2 cortes de alfalfa se obtiene 5880 kg por año	18560 kg por año de forraje verde hidropónico con 96 bandejas de producción.
300 litros para producir 1 kg de alfalfa	2 a 4 litros para producir 1 kg de semilla de maíz o avena forrajera (FVH)
150 litros para producir 1 kg de maíz forrajero	No se tiene perdida por el tipo de riego y la reutilización que se pueda realizar.
Perdida de agua por percolación, escorrentía, evaporación y evapotranspiración.	

Como señala Soares, et al. (2010), es interesante discutir la hidroponía como un sistema de producción para zonas semiáridas, preguntándose: ¿La hidroponía puede ser viable en zonas semiáridas? Para responder a esta pregunta es importante considerar y contextualizar las ventajas para las condiciones semiáridas.

CONCLUSIONES

Las aguas subterráneas presentan altos contenidos de sales, en comparación con las aguas superficiales (Toma de canal) y aguas más profundas (pozo a 20 metros para consumo familiar), asimismo el nivel del agua se mantiene en los pozos instalados en las cercanías de las fuentes de agua, llegando a disminuir en las áreas que alejadas de las fuentes de agua, esto también se ve influenciada por la topografía del terreno que es llano con pendientes menores al 1% en casi toda el área de estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos para dos periodos futuros como ser 2011 – 2030 y 2046 – 2065, bajo dos escenarios futuros de cambio climático como es el A2 y B1 recomendados para la región, el incremento en las temperaturas mínimas y máximas que se ha evidenciado en promedio alcanza un valor de 2 °C. Asimismo la Evapotranspiración diaria llega a incrementarse para algunos meses. Se observa una disminución de las áreas bajo riego óptimo y las áreas incrementales, en los escenarios futuros lo que afectara de manera directa en la demanda de agua para riego.

Se plantea la implementación de la producción de Forraje verde hidropónico en condiciones reales de campo, en ese sentido planteamos la producción de forraje en una superficie reducida de 24 m² (12 m² reales que ocupan las bandejas) que puede lograr obtener un rendimiento equivalente a 6 hectáreas de cultivo en campo. Los rendimientos obtenidos en la zona para el cultivo de alfalfa llegan a ser de 5880 kg ha⁻¹ por año en dos cortes, con la producción de forraje verde hidropónico se logrará obtener un rendimiento de 18250 kg de materia verde por año. Los costos de inversión ascienden a un total de 21367,5 (Bs) Bolivianos que inicialmente parece ser un monto elevado, sin embargo a largo plazo podría permitir generar ingresos por la venta de forraje verde y la mejora en los precios de venta del ganado. El uso del agua bajo los sistemas de producción hidropónicos ahorra más del 50 % del uso del agua bajo condiciones reales en campo.

BIBLIOGRAFIA

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). 2007. Working group II Contribution to the intergovernmental panel on climate change fourth assessment report. Climate change 2007: Climate change impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers, 23 pp.

Rocha, O., Aguilar, S. 2008. Bases técnicas para el plan de manejo de sitios Ramsar Lagos Poopó y Uru Uro, Oruro – Bolivia. Ministerio de Desarrollo Rural Agropecuario y Medio Ambiente, Vice ministerio de Biodiversidad, Recursos Forestales y Medio

Ambiente, Secretaria General de Recursos Naturales y Medio Ambiente Prefectura de Oruro. Centro de estudios en Biología Teórica y Aplicada – BIOTA.

Ledezma, R., Jiménez, A., Moreau, S., Coudrain-Ribstein, A. 1995. Recursos hídricos para riego en la provincia Villarroel, Altiplano Boliviano.

López-Aguilar, R., et al. 2009. El Forraje verde hidropónico (FVH): Una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, Vol 34, N° 2.

Lacerda, C., Costa, R., Bezerra, M., Gheyi, H. 2010. Estrategias de manejo para uso de agua salina na agricultura; Manejo da salinidade na agricultura. *Estudos básicos e aplicados*. Pag. 304.

Soares, T., Duarte, S., Silva, E., Paz, V., Barcelos-Oliveira, J. 2010. Uso de águas salobras em sistemas hidropónicos de cultivo, Manejo da salinidade na agricultura. *Estudos básicos e aplicados*. Pag. 338.