

SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE QUINUA EN EL ALTIPLANO BOLIVIANO CON EL MODELO DE AQUACROP CON ESCENARIOS FUTUROS GENERADOS POR LARS-WG Y QPM

Simulation of Quinoa Production (AquaCrop) with Generated Future Climate scenarios (LARS-WG and QPM) in the Bolivian Altiplano.

Gavi Alavi¹, Jan Diels², Patrick Willems³, Magali García⁴

RESUMEN

El Altiplano de Bolivia es una región semiárida a árida con condiciones adversas para la agricultura (4000 msnm). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), alimento altamente nutritivo, está bien adaptado a las condiciones desfavorables del Altiplano. El presente estudio tiene como objetivo determinar el impacto del cambio climático sobre la quinua en tres localidades del Altiplano boliviano (Viacha, Patacamaya y Rio Mulatos). Dos métodos de downscaling se emplearon para generar escenarios climáticos futuros (SREs y RCPs): LARS (escenarios B1, A1B y A2 para SRE) y QPM (escenarios 4.5 y 8.5 para RCP). Precipitación, temperatura máxima y mínima fueron generados para tres diferentes periodos (2030s, 2050s y 2090s). Para estimar la productividad de la quinua se utilizó el modelo AquaCrop. Entre los resultados se tiene que las temperaturas máximas y mínimas se incrementan más en RCPs que en SREs, para los años 2030s y 2090s. La precipitación mensual no mostró cambios significantes durante la época seca. El número de días con heladas se reducen. Asimismo, las probabilidades de periodos de helada que pueden dañar a la quinua (-3°C) se reduciría. AquaCrop estima que el ciclo promedio se reduciría en todas las localidades y escenarios. Además, indicaron que si las condiciones de manejo en el campo (riego a seco, poca fertilidad, etc.) son similares a las actuales la producción no varía mucho para SRE. Sin embargo para RCPs, en Patacamaya y Rio Mulatos la producción se reduciría en un rango de 0,1 a 0,2 Mg ha⁻¹.

Finalmente, en Patacamaya y Rio Mulatos se espera que la pérdida de producción por el estrés hídrico se incremente y en Viacha se presente un leve decremento en el estrés hídrico. Efectos positivos y negativos en la quinua son esperados en el Altiplano boliviano.

Palabras clave: LARS-WG, QPM, downscaling, quinua, periodos de helada, Altiplano, Bolivia

ABSTRACT

The Bolivian Altiplano is a semi-arid to arid region with harsh conditions for agriculture (4000 masl). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), a highly nutritious food, is well adapted to Altiplano's unfavorable conditions. The objective of this research was to forecast the impact of climate change on quinoa in 3 locations of the Bolivian Altiplano (Viacha, Patacamaya and Rio Mulatos). Two downscaling methods were used to generate future climate scenarios (SRE and RCP scenarios): LARS (B1, A1B and A2 scenarios for SRE) and QPM (4.5 and 8.5 for RCP). Precipitation, minimum and maximum temperature for three different periods: 2030s, 2050s and 2090s were generated. AquaCrop estimated the crop productivity. Among results, the minimum and maximum temperatures will increase more for the RCP scenarios than SRE scenarios by 2030s and 2090s. The monthly precipitation will not show significant changes during the dry season. The number of frost years will reduce. The AquaCrop model estimated that the average cropping cycle will reduce for all locations and scenarios. Thereby, the results indicated that if the management conditions on the field (rainfed, soil with poor fertility, etc.) are similar to the current, the yield will not change much

for the SRE scenarios. Besides, RCPs showed in Patacamaya and Viacha is expected that the yield will decrease in a range of 0,1 to 0,2 Mg/ha. Finally,

1 Maestrante del programa IUPWARE – Katholieke Universiteit Leuven University.

2 Docente de Katholieke Universiteit Leuven University, Division of Soil and Water Management.

3 Docente de Katholieke Universiteit Leuven, Department of Civil Engineering.

4 Docente Facultad de Agronomía- Universidad Mayor de San Andrés.

in Patacamaya and Rio Mulatos the yield losses by water stress have shown an increasing pattern and in Viacha it was seen slight decrease of the water stress. Then, positive and negative effects on quinoa crop are expected in the Bolivian Altiplano.

Keywords: LARS-WG, QPM, downscaling, quinoa, frost periods, Altiplano, Bolivia

INTRODUCCIÓN

El Altiplano Boliviano es una región semiárida a árida, con una altitud promedio de 4000 msnm. Esta región es caracterizada por sus adversas condiciones para actividades agrícolas como suelos pobres en nutrientes, heladas y sequías frecuentes, y alta demanda evaporativa (Geerts et al., 2008). Bolivia es un país ubicado en la zona tropical con un área de más de un millón de kilómetros cuadrados (1098 581 km²). La división altitudinal corresponde a las zonas bajas (<800 msnm), valles (800-3200 msnm) y altiplano (3200-6500 msnm). El Altiplano está localizado en la parte oeste del país. A pesar de sus temperaturas extremas, una corta e irregular época de lluvia y condiciones desfavorables de suelo, el Altiplano es una zona agrícola muy importante (Geerts et al., 2006). La temperatura máxima media anual es alrededor de 16°C, la precipitación anual de la región sur del Altiplano es de 140-250 mm (Jacobsen, 2011). Con el propósito de estudiar la evolución del clima en la Tierra, Modelos Climático Global (MCG) están siendo desarrollados. Los MCG simulan el cambio climático bajo diferentes posibles escenarios futuros a nivel global. Pero para realizar trabajos a menor escala o puntuales, los métodos de “downscaling” están siendo usadas. Estos métodos son herramientas para simular datos climáticos sintéticos con características estadísticas similares a las observadas. Actualmente, los generadores climáticos son ampliamente usados para diferentes áreas de estudio como estudios sobre la producción de cultivos, recursos hídricos, análisis de riesgos de inundaciones, etc. (Semenov et al., 1998; Fatichi et al., 2011). En este estudio, se usaron dos métodos de downscaling: LARS-WG (Long Ashton Research Station – weather generator) and QPM (Quantile Perturbation Method) que pertenecen al tipo de downscaling estadístico. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) ha desarrollado futuros escenarios potenciales del clima. Las proyecciones climáticas para el cuarto informe del IPCC (AR4) están basados en los escenarios de emisiones (IE-EE o SRE siglas en inglés) los cuales toman en cuenta factores socioeconómicos y que constan de 4 familias o líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2). Sin embargo, recientemente el IPCC en su quinto informe

ha desarrollado nuevos escenarios llamados vías de concentración representativa (VCR o RCPs siglas en inglés). En este caso se llaman representativas, porque concentran escenarios diferentes pero con forzamientos radiativos similares. El forzamiento radiativo es la cantidad media de energía solar absorbida por metro cuadrado sobre la tierra y se mide en W/m². Los RCPs se dividen también en 4 grupos (RCP2.0, RCP4.5, RCP6.0 y RCP 8.5).

El cultivo de la quinua, alimento con alto valor nutricional, está bien adaptado a las condiciones desfavorables de la región. Adicionalmente, en los últimos años la importancia económica también se ha incrementado. Por ejemplo, (Jacobsen, 2011) menciona que la quinua tiene ahora mayor valor en el mercado internacional. Además, la quinua fue promovida por varias instituciones como la Asamblea General de las Naciones Unidas que ha declarado el 2013 como “El año internacional de la quinua”. Por todo lo mencionado la producción de este cultivo también se ha incrementado.

A pesar de que la quinua es tolerante a los eventos de sequía y helada, la producción del grano puede verse gravemente afectada como en el 2011, cuando se perdió el 50% a falta de precipitación (La Razon, 2011). (Jacobsen et al., 2007) indico que las heladas son eventos de gran importancia en la región altiplánica y aún más en la región sur de Bolivia y Perú que tienen hasta 200 días con helada al año. Asimismo, las sequías ocurren tanto intermitentemente (altamente impredecible) como terminal. Sequías tempranas después de la emergencia daría paso a la resiembra y también causar in incremento en el riesgo de sufrir de estrés hídrico durante la formación del grano y finalmente retrasar causar pérdida en la cosecha (Garcia et al., 2007).

El modelo AquaCrop fue desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para el cálculo de la productividad de cultivos en relación a la disponibilidad de agua para la planta y manejos agronómicos. Este modelo fue seleccionado por que conserva un buen balance entre robustez (pocos datos requeridos) y precisión de resultados. Entre los datos requeridos están datos climáticos (temperatura máxima y mínima, precipitación y evapotranspiración), del cultivo (cobertura vegetal, profundidad de raíz, e información sobre las etapas fenológicas), suelo (contenido de agua a diferentes niveles como saturación, capacidad de campo y marchitez de punto permanente además de conductividad hidráulica), e información general acerca de riego y manejo agrícola.

Considerando todo lo señalado precedentemente sobre la producción de quinua es importante realizar

estudios acerca de cómo el cambio climático puede afectar la producción de quinua, el objetivo del presente estudio fue el de simular la producción de quinua con el modelo AquaCrop para escenarios climáticos futuros generados por LARS-WG and QPM. Para lograr este objetivo se evaluó los métodos de downscaling para generar datos climáticos futuros. Luego se realizó un análisis de eventos extremos (sequías y heladas) para los periodos 2030s, 2050s y 2090s. Finalmente, se evaluó el efecto del clima futuro generado en la quinua. La hipótesis planteada fue: (i) el cambio climático afectara la producción y el ciclo del cultivo en los años futuros, y (ii) mayor frecuencia de eventos extremos tendrán gran impacto en la producción de quinua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en tres localidades del altiplano. Viacha y Patacamaya en la región central y Rio Mulatos en la región sur. Los datos climáticos (temperatura máxima y mínima y precipitación) fueron extraídos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el proyecto QUINAGUA de la UMSA. Los periodos de evaluación para Viacha fueron de 1985 a 2013, Patacamaya de 1980 a 2013, y Rio Mulatos de 1983 a 2010.

Los datos climáticos diarios para tres diferentes periodos (2030s, 2050s y 2090s) fueron generados por LARS-WG y QPM. LARS fue utilizado para generar los escenarios SRE, los escenarios seleccionados fueron B1, A1B y A2. Mientras que QPM fue utilizado para generar escenarios RCPs, los futuros escenarios seleccionados fueron RCP4.5 y RCP8.5.

Se realizaron los cálculos del número de heladas (temperaturas bajo 0°C) anuales y seguidamente, la probabilidad de periodos de helada que afectan la producción de quinua. El umbral de temperatura que daña a la quinua fue asumido como -3°C, esta temperatura afectaría seriamente la producción si ocurre en época de floración (Jacobsen et al., 2005; Geerts et al., 2006). Entonces probabilidades de que este evento ocurra más de 1 día, más de 7 días, más de 15 días, más de 28 días al mes fueron calculadas.

En el modelo AquaCrop, el ciclo del cultivo y la producción fueron simulados y finalmente se determinó el efecto de las sequías al cultivo expresado en pérdida en la producción por el estrés hídrico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clima generado

En la Figura 1. se observa el cambio promedio de temperatura. Para el periodo de 2030s se observa que los RCPs (1,5°C) muestran mayor cambio en la temperatura que los SREs (0,6°C). En los 2050s, ambos grupos de escenarios (SREs y RCPs) muestran cambios similares en un rango de 1 a 2,5°C. Finalmente, para los 2090s se observa mayor variación entre los escenarios con cambios desde alrededor de 2°C (B1) a 4°C (A2) para los SREs y en caso de RCPs las temperaturas varían de 2,5°C (RCP4.5) a 5°C (RCP8.5).

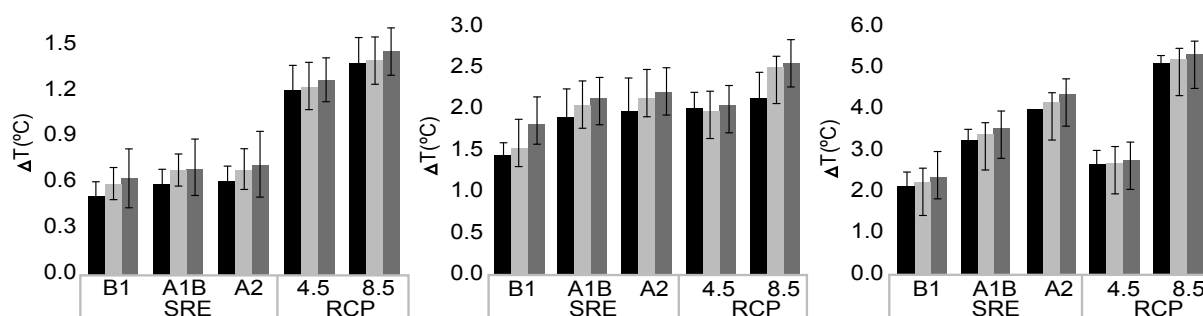


Figura 1. Cambio promedio de la temperatura en Viacha (columna negra), Patacamaya (columna gris) y Rio Mulatos (columna gris clara) para diferentes periodos: 2030s (izquierda), 2050s (centro) y 2090s (derecha) obtenidas de la diferencia entre lo observado y los futuros escenarios. Las barras verticales indican la desviación estándar a lo largo del año.

La precipitación de acuerdo al IPCC en su quinto reporte (escenarios RCPs) indica mayor precipitación durante la época lluviosa para la región Altiplánica de Sud América. Este cambio es observado en Viacha para los RCPs.

Patacamaya y Rio Mulatos no muestran ningún cambio para estos mismos escenarios (RCPs). Adicionalmente, de acuerdo a SREs no se observa cambios significativos para las tres localidades (Figura 2).

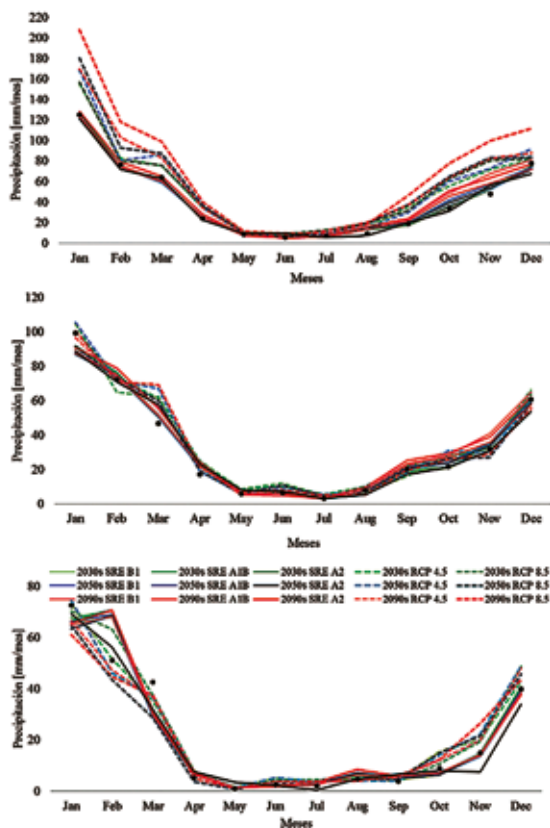


Figura 2. Precipitación media mensual de los datos observados (puntos negros) y generados por LARS (líneas) y QPM (líneas punteadas) para periodos futuros en Viacha (arriba), Patacamaya (medio) y Río Mulatos (abajo). La línea negra representan la precipitación generada por LARS para el periodo base

Con respecto a las heladas, con el incremento de la temperatura, de forma proporcional el número de días con temperaturas por debajo de 0°C al año se reducen en las 3 localidades (Este decremento es mucho más para RCPs que SREs. Por ejemplo, en Viacha para los 2030s en promedio se reducen en un 3% para SREs y 14% menos de heladas para los RCPs. Esta reducción es mayor para los 2050s que están en un rango de 14 a 32% y para los 2090s de 25 a 97% se reducen los días de heladas. Los RCPs siempre con los valores más altos.

Tabla 1).

Este decremento es mucho más para RCPs que SREs. Por ejemplo, en Viacha para los 2030s en promedio se reducen en un 3% para SREs y 14% menos de heladas para los RCPs. Esta reducción es mayor para los 2050s que están en un rango de 14 a 32% y para los 2090s de 25 a 97% se reducen los días de heladas. Los RCPs siempre con los valores más altos.

Tabla 1. Numero de heladas (<0°C) por año para los escenarios SRE y RCP en diferentes periodos

Localidad	Código	Escenario	Actual	2030s	2050s	2090s
VIACHA	SRE	B1	164 ± 18	160 ± 2	143 ± 5	131 ± 8
		A1B		159 ± 2	135 ± 6	113 ± 12
	RCP	A2		158 ± 2	133 ± 1	99 ± 5
		4.5		145 ± 6	133 ± 10	122 ± 11
		8.5		142 ± 4	124 ± 6	83 ± 10
PATACAMAYA	SRE	B1	155 ± 18	148 ± 2	131 ± 6	118 ± 11
		A1B		147 ± 2	121 ± 8	95 ± 15
	RCP	A2		146 ± 2	119 ± 2	76 ± 7
		4.5		136 ± 7	122 ± 12	110 ± 13
		8.5		132 ± 5	112 ± 8	63 ± 15
RIO MULATOS	SRE	B1	237 ± 34	229 ± 2	134 ± 6	182 ± 15
		A1B		230 ± 2	215 ± 5	202 ± 10
	RCP	A2		229 ± 1	204 ± 3	165 ± 5
		4.5		229 ± 6	217 ± 8	206 ± 10
		8.5		224 ± 7	203 ± 16	141 ± 39

Heladas que afectan al cultivo de quinua.

De acuerdo a García et al. (2007), el periodo de heladas en el Altiplano Boliviano está concentrado de Abril a Octubre. En Viacha (Figura 3) y Patacamaya hasta los 2090s se reduciría

sistemáticamente de Mayo a Septiembre. En el caso de Río Mulatos que es la región más seca y fría, el periodo de heladas se reduce de Abril a Octubre en los 2090s.

in the Altiplano from two homogeneity criteria, which are the LDCs and seasonal index of precipitations. Subsequently the analysis of temperature and precipitation projections was performed of four localities of the central Altiplano (Patacamaya and Oruro) and Southern Altiplano (Rio Mulatos and Uyuni), through a statistical downscaling under the General Circulation Model boundaries ECHAM5.0 with the conditions defined by the IPCC (2007) for the A2 scenario. Finally, the water requirement for quinoa crop was found for the present and projected conditions for the decades 2020-2029 and 2046-2055 comparing the obtained yield production with rainfed and deficit irrigation. The results show that the precipitation differences among northern, central and southern Altiplano were identified. For a probability of not exceeding 50% (normal year) over northern and central Altiplano is between 404 and 800 mm/year, in the southern highlands between 156-400 mm / year. This shows the aridity characteristic of the southern Altiplano. The minimum and maximum temperature will increase from 2 to 3 ° C over the four locations. Precipitations changes are smaller; the projected precipitation for the decade 2020-2029 will decrease between 1 and 4% and for the decade 2046 to 2055 annual precipitation will decrease between 1 to 8%. The results with deficit irrigation applied on quinoa crop showed an increase over quinoa's yield.

Keywords: Quinoa, Water requirement, Downscaling, LARS

INTRODUCCIÓN

La precipitación constituye una de las principales fuentes de agua para la producción agrícola en el Altiplano de Bolivia. La quinua es un cultivo prioritario de la zona y se caracteriza por ser resistente a sequías en ciertas etapas de desarrollo. La producción de quinua en el Altiplano de Bolivia es generalmente a secano. El análisis de frecuencias es la estimación de cuán seguido ocurre un evento específico, se basa en el estudio de datos en sitios determinados con observaciones típicas de la misma variable en una región definida, donde el análisis regional de frecuencias se aplica siempre y cuando múltiples muestras presentan disponibilidad de datos similares (Hosking y Wallis, 1997). El análisis regional de frecuencias basado en L-momentos (ARF-LM) es usado para estimar cuantiles mediante un ajuste de distribuciones de probabilidad (UNESCO, 2010).

En palabras de Hosking y Wallis (1997), el procedimiento compensa la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio. Dado que el Altiplano constituye una región con características similares en distribución temporal de

precipitación, el desarrollar el ARF-LM en el Altiplano Boliviano permite contar con una herramienta de estimación de Precipitación Media Anual (PMA) en determinadas probabilidades de ocurrencia de eventos, donde la PMA es el promedio de precipitación total de lluvia registrada en un año. Bajo la posibilidad de un clima cambiante, el análisis de precipitaciones de registros históricos del Altiplano de Bolivia debe ser complementado con el estudio de posibles impactos de cambio climático en el futuro sobre el sector productivo agrícola, priorizando en este caso el cultivo de la quinua debido a su importancia en el área. En este ámbito la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) indica que el downscaling o reducción de escala es un método para obtener información climática o de cambio climático de alta resolución a partir de los Modelos de Circulación General (MCG's).

El downscaling (reducción de escala) estadístico es una herramienta de fácil acceso con buenos resultados. Diversos autores y agencias (UNFCC (2005), por ejemplo Canadian Climate Change Scenarios Network (2013) entre otros sugieren su uso a nivel local. Estos autores describen que entre los diversos métodos de regionalización o downscaling estadístico están: a) Funciones de transferencia, basadas en modelos de regresión, lineales y no lineales para derivar las relaciones entre predicciones locales y predicciones de larga escala. b) Tipos de tiempo y métodos de análogos, basados en modelos de vecinos cercanos o de clasificación de tiempos en un número de grupos con similares tipos de tiempo meteorológico y c) Generadores de tiempo, a través de la simulación estocástica de series de valores diarios consistentes con la climatología disponible. Posteriormente se identificó su utilidad para la regionalización local por su capacidad de reproducir la climatología diaria, la cual, integrada con los resultados de los Modelos de Circulación General, ha mostrado una amplia y barata aplicabilidad para la evaluación de condiciones futuras locales. Dentro de estos últimos, el modelo LARS-WG (Semenov y Barrow (1997), Semenov et al. (1998) ha mostrado capacidad para reproducir adecuadamente las condiciones meteorológicas locales de puntos situados bajo variadas condiciones fisiográficas y meteorológicas.

Considerando la importancia del cultivo de la quinua, se requiere evaluar la vulnerabilidad y flexibilidad del sistema productivo. A pesar de la tolerancia de la quinua a factores abióticos adversos, la producción actual en condiciones a secano presenta un rendimiento promedio de 0,6 toneladas por hectárea según el Instituto Nacional de Estadística (2007). Por este motivo el riego constituye una alternativa

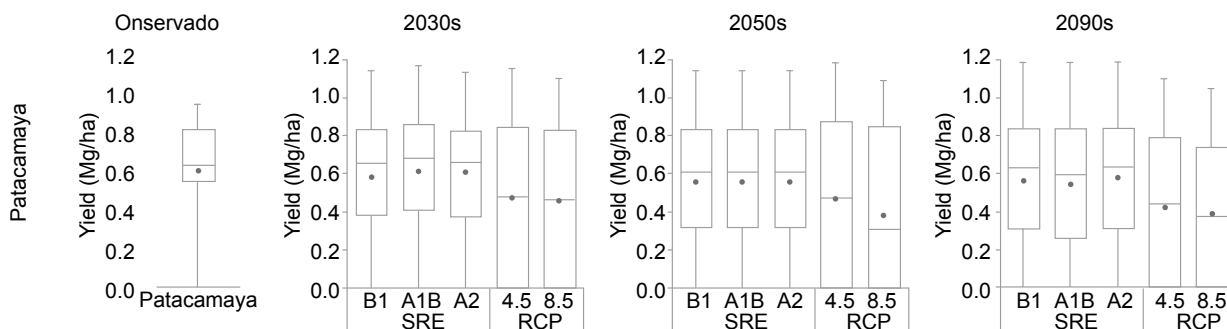


Figura 5. Producción simulada para el periodo actual y periodos futuros (2030s, 2050s y 2090s) y diferentes escenarios futuros posibles (SREs y RCPs). Los puntos negros son la producción de grano promedio

El efecto de las sequías, la producción perdida por estrés hídrico (Figura 6) que sufre la quinua muestra los siguientes resultados. Para los SREs se observa que existe una tendencia de incremento en la pérdida de cosecha por estrés

hídrico a lo largo de los periodos para las tres localidades. Para RCPs, en Viacha se observó que el estrés hídrico se reduce y esto es debido a que para RCPs hay mayor precipitación lo que provocara menor estrés hídrico.

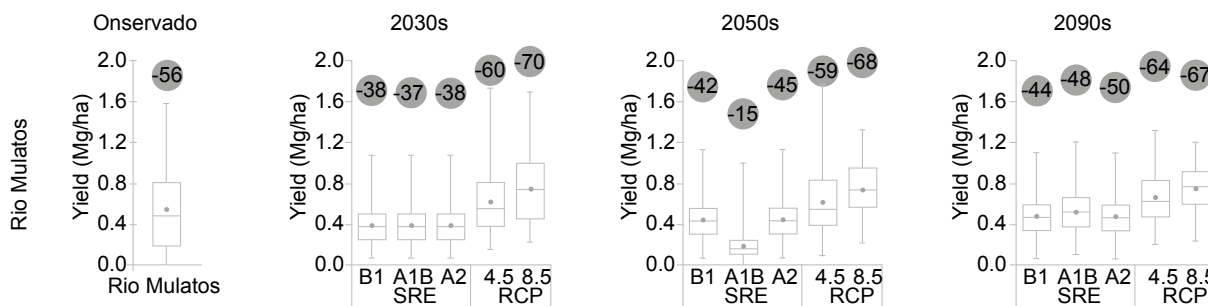


Figura 6. Diferencia entre rendimiento bajo riego y seco. Puntos plomos son porcentajes que han sido perdidos por estar bajo condiciones de sequeno (estrés hídrico).

CONCLUSIONES

La temperatura se incrementará significativamente en las tres localidades para los 2030s. Los escenarios SREs con un cambio de 0,6°C y para RCPs con 1,2°C. Le tendencia del incremento se seguirá observando hasta el final del Siglo 21.

A lo largo del Siglo 21, la precipitación en Patacamaya y Rio Mulatos de acuerdo a los SREs y RCPs no sufrirá cambios significativos, en cambio para Viacha solo en escenarios RCPs muestran mayor precipitación para la época lluviosa (Octubre – Marzo).

Debido al incremento en la temperatura, el número de días con helada (<0°C) y las probabilidades de periodos de helada que afectan la producción de quinua (<-3°C) se reducen.

La quinua es afectada claramente por el incremento en la temperatura, ya que la sumatoria térmica necesaria para este cultivo se alcanzará en menor tiempo, lo que significa que los ciclos se acortan.

Bajo condiciones de manejo similares al actual, riego a seco y poca fertilidad, la quinua no mejora su producción a pesar de tener menor probabilidad de verse afectada por heladas. Por un lado, al tener ciclos más cortos, el desarrollo fenológico es también más rápido lo que no permite que la planta reciba la radiación necesaria para generar buena producción. Por otro lado, la precipitación al permanecer sin incrementos significativos (excepto para Viacha en RCPs) se considera otra de las causas de la baja producción. Esta falta de precipitación que muestran los escenarios SREs y RCPs es reflejado en la pérdida de la producción por estrés hídrico que tiene una tendencia ligera de incremento a lo largo del Siglo 21, con excepción de Viacha para escenarios RCPs.

En base a los resultados obtenidos, algunas recomendaciones son sugeridas al productor como la siembra temprana para evitar las temperaturas más altas que provocan el rápido desarrollo de la planta; siembra tardía para garantizar que la época de floración, una de las etapas más sensibles al estrés hídrico, coordine

con las meses de mayor precipitación; Utilizar variedades de crecimiento lento. Finalmente, aplicar técnicas de riego deficitario podría permitir al productor usar el agua de forma más eficiente y así lograr mayor producción.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. 2012. ETo calculator.

Faticchi, S., Ivanov, V. Y., Caporali, E. 2011. Simulation of future climate scenarios with a weather generator, *Adv. Water Resour.* 34, 448–467. doi:10.1016/j.advwatres.2010.12.013

Garcia, M., Raes, D., Jacobsen, S. E., Michel, T. 2007. Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano. *J. Arid Environ.* 71, 109–121. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.02.005

Geerts, S. 2008. Deficit irrigation strategies via crop water productivity modeling: Field research of quinoa in the Bolivian Altiplano. Leuven: Belgium.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C., Buytaert, W. 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agric. For. Meteorol.* 139, 399–412. doi:10.1016/j.agrformet.2006.08.018

Jacobsen, S. E. 2011. The Situation for quinoa and its production in southern Bolivia: From economic success to environmental disaster. *J. Agron. Crop Sci.* 197, 390–399. doi:10.1111/j.1439-037X.2011.00475.x

Jacobsen, S. E., Monteros, C., Christiansen, J. L., Bravo, L. A., Corcuera, L. J., Mujica, A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) to frost at various phenological stages. *Eur. J. Agron.* 22, 131–139. doi:10.1016/j.eja.2004.01.003

Jacobsen, S. E., Monteros, C., Corcuera, L. J., Bravo, L.A., Christiansen, J. L., Mujica, A. 2007. Frost resistance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). *Eur. J. Agron.* 26, 471–475. doi:10.1016/j.eja.2007.01.006

La Razón. 2011. Producción de quinua bajará en 50% a causa de sequía y heladas [WWW Document]. *La Razón*. URL http://la-razon.com/economia/Produccion-quinua-bajara-sequia-heladas_0_1331866826.html (accessed 4.30.14).

Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., Richardson, C. W. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates 10, 95–107.