

Documento de Trabajo IISEC-UCB N° 202106

<http://www.iisec.ucb.edu.bo/publicaciones-documentos-de-trabajo-iisec-bolivia>

ADAPTACIÓN A LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS BASADOS EN PAPA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

Por:

Carlos Eduardo Quezada Lambertin

Diciembre, 2021

Este documento fue desarrollado por un investigador junior del Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC) de la Universidad Católica Boliviana “San Pablo” quien también fue becario de la Fundación Hanns Seidel en la gestión 2019. Las opiniones expresadas en este documento pertenecen al autor y no reflejan necesariamente las opiniones del IISEC.

Los documentos de trabajo del IISEC se distribuyen con fines de discusión y comentarios, y a menudo representan el trabajo preliminar de los autores. La citación de un documento de este tipo debe considerar su carácter provisional. Una versión revisada puede consultarse directamente con el autor.

Citación sugerida: Quezada Lambertin, C. E. (2021) *Adaptación a los impactos del cambio climático de sistemas agrícolas basados en papa del altiplano boliviano* (Documento de Trabajo IISEC-UCB No. 6). Disponible en: http://www.iisec.ucb.edu.bo/assets_iisec/publicacion/202106.pdf.

Instituto de Investigaciones Socio-Económicas (IISEC)

ADAPTACIÓN A LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS BASADOS EN PAPA DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

Carlos Eduardo Quezada Lambertin¹

¹*Investigador junior Instituto de Investigaciones Socio Económicas - Universidad Católica Boliviana “San Pablo”*

¹*Contacto: cae.qlamb@gmail.com*

13 de diciembre de 2021

Resumen

La papa es uno de los cultivos más importantes para la seguridad alimentaria en Bolivia, y gran parte de los sistemas agrícolas del altiplano boliviano se basan en este cultivo. Sin embargo, los rendimientos nacionales son los más bajos de la región (5.7 Tn ha^{-1}) y los sistemas agrícolas son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático. Esta situación puede agravarse en escenarios climáticos futuros. El objetivo del presente estudio es evaluar la adaptación al cambio climático del cultivo de la papa bajo el peor escenario climático para el año 2050 utilizando tres medidas de adaptación: gestión del calendario agrícola, manejo de la diversidad biológica y aplicación de riego complementario. Para ello, se emplea el modelo de simulación de cultivos APEX y se simula el crecimiento y rendimiento de papa bajo el escenario Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) 8.5 en la localidad de Patacamaya. Los resultados muestran un incremento significativo en los rendimientos productivos para todas las medidas, y cuando se combinan las tres medidas, la efectividad para reducir los impactos del cambio climático se incrementa, y en consecuencia los rendimientos productivos aumentan en un 48 % (46 Tn ha^{-1}) y la resiliencia de los sistemas agrícolas basados en papa mejora.

Palabras Clave: Producción papa, adaptación al cambio climático, modelos de simulación, altiplano boliviano.

Clasificación JEL: Q01, Q19, Q24, Q25

Abstract

Potato is one of the most important crops for food security in Bolivia. In the Bolivian Altiplano, most of the agricultural systems are based on this crop. However, national yields are the lowest in the region (5.7 Tn ha^{-1}), and agricultural systems are highly vulnerable to the impacts of climate change. This situation may be worse in future climate scenarios. The aim of this study is to evaluate the potato production adaptation to climate change under the most pessimistic climate scenario in the year 2050 using three adaptation strategies: management of the agricultural calendar, management of biological diversity, and application of complementary irrigation. For this purpose, the APEX crop simulation model is used to simulate potato growth and yield under the Representative Concentration Path (RCP) 8.5 scenario in the Patacamaya community (Bolivian Central Altiplano). The results show a significant increase in potato yields for each adaptation measure, and when the three strategies are combined, the effectiveness to reduce the impacts of climate change increases, and consequently, productive yields increase by 48 % (46 Tn ha^{-1}), and potato-based systems resilience is improved.

Keywords: Potato production, adaptation to climate change, simulation models, Bolivian highlands.

JEL classification codes: Q01, Q19, Q24, Q25

1 Introducción

El cultivo de papa es uno de los más importantes en Latinoamérica, y en Bolivia es el cuarto cultivo después de la soya, el maíz y sorgo, con 175 mil hectáreas cultivadas y 1.3 millones de toneladas producidas en el año 2019 (BDP, 2019; FAO, 2021). En los andes y altiplano boliviano, la papa cumple un importante rol para la seguridad alimentaria y la economía de la región, ya que aporta con el 50 % de la energía alimentaria. La producción de papa es una de las principales fuentes de ingresos para la agricultura familiar y genera alrededor de 134 mil fuentes de empleo directos y 200 mil indirectos (Azeñas & Benavides, 2020; Condori *et al.*, 2008; Saavedra *et al.*, 2014; Tito Velarde & Wanderley, 2021; Torrico, 2018b). Por otro lado, pese que existe un mayor interés por parte de los pequeños productores agrícolas en cultivar variedades de papa comerciales (Waycha, Desirée), la producción todavía se caracteriza por su alta agrobiodiversidad. Adicionalmente, gran parte de los sistemas agrícolas de esta región basan la planificación y gestión de otros cultivos en torno a la papa (Canqui & Morales, 2009; Condori *et al.*, 2014).

Pese a su importancia, la producción de papa en Bolivia no logra satisfacer la demanda interna. En efecto, a pesar del incremento de la producción nacional en los últimos 20 años, una publicación de Fundación TIERRA (2019) indica que en 2000 se importaron 1,282 toneladas de papa, mientras que en 2017 se llegó a importar 33,430 toneladas. A esto se suma los bajos rendimientos productivos (5.7 Tn ha^{-1}) que en comparación con los demás países productores de papa de la región Bolivia presenta el rendimiento más bajo; 2.3 veces menor que Paraguay y 3 veces menor que Perú en 2010 (Prudencio, 2012, 2020).

La agricultura familiar y los sistemas agrícolas ligados a este sector atraviesan por una crisis multidimensional que incumbe a ámbitos ambientales, económicos y socioculturales. En consecuencia a los bajos rendimientos, la competitividad de los productores bolivianos se ve deteriorada frente a mercados externos de papa y otros alimentos, y la dependencia del sistema alimentario nacional de la importación de alimentos se incrementa (Prudencio, 2020; Tito Velarde & Wanderley, 2021). Además, entre las causas intrínsecas del bajo rendimiento de la producción de papa se encuentran el déficit hídrico, la erosión y baja fertilidad de los suelos, el limitado acceso a semillas de calidad, carencia de infraestructura y sistemas para riego, la presencia de plagas y enfermedades; y los fenómenos naturales extremos tales como las sequías, heladas y granizadas. (Condori-Mamani *et al.*, 2017; Condori *et al.*, 2008; Luque Salcedo, 2018; Rojas Mamani & Ledent - Francois, 2014; Saavedra *et al.*, 2014).

Los fenómenos naturales que se traducen en eventos peligrosos cuando sobrepasan la capacidad de respuesta de la sociedad se convierten en desastres naturales. En los últimos años, la magnitud y frecuencia en que se presentan incrementó como consecuencia del cambio climático. La agricultura es el sector que más afectado debido a estos incrementos que asume cada vez mayores pérdidas monetarias y reducciones de rendimientos productivos (Torrico, 2018a, 2018b). La agricultura familiar es extremadamente vulnerable al cambio climático y sus impactos, y dado que este sector se encarga de casi el 100 % de la producción de papa, los sistemas agrícolas basados en este cultivo son también vulnerables, por lo que la seguridad alimentaria de las familias que dependen de este cultivo se ve amenazada. En este sentido, las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático son urgentes para responder a posibles escenarios climáticos futuros.

Al respecto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) establece escenarios climáticos globales robustos. De acuerdo al último informe de esta organización (IPCC, 2014b), el escenario RCP¹ 8.5 representa a la situación climática futura más crítica, en la cual se espera que la concentración media global de CO_2 para el año 2050 sea de aproximadamente 650 ppm, mientras que en el escenario menos pesimista, RCP 2.6, se espera una concentración de CO_2 atmosférico de 450 ppm. Estas perspectivas implicarían incrementos en la temperatura, cambios marcados en los patrones de precipitación y variaciones en la incidencia de eventos extremos, principalmente las sequías y heladas, para la región andina y altiplano de Bolivia (Hoffmann & Requena, 2012; Pinto, 2010).

Para el caso de la agricultura en la región del altiplano boliviano, entre las medidas y estrategias relacionadas específicamente al manejo agronómico y los aspectos biofísicos de los sistemas productivos para incrementar la resiliencia y adaptación al cambio climático se han identificado como importantes al manejo de la diversidad biológica, la integración a los sistemas agrícolas de cultivos resistentes a impactos externos (heladas, sequías, enfermedades, etc.), el manejo adecuado de nutrientes y plagas, la gestión integral de los recursos hídricos y riego, ajustes en las fechas de siembra, y cosecha, y el mejoramiento de semillas y variedades (Perez *et al.*, 2010; Torrico, 2018b). Estudiar estas medidas y los factores que podrían incidir en el crecimiento y rendimientos productivos en el futuro es una tarea compleja, y los procedimientos más comunes empleados para alcanzar este objetivo suelen ser experimentos de campo controlados que requieren de largos periodos de tiempo, equipos de medición especializados y recursos económicos (Kephe *et al.*, 2021). Es por esta razón que una alternativa de bajo costo, menor tiempo y más efectiva para estudiar la producción agrícola en todo el mundo es la aplicación de modelos de simulación de cultivos (Choruma *et al.*, 2019).

En las últimas décadas se vienen desarrollando y aplicando modelos de simulación de cultivos, siendo estas herramientas informáticas capaces de representar las interacciones agrofisiológicas, medioambientales y de manejo del desarrollo y crecimiento de una amplia diversidad de cultivos (Keulen, 2013). Existe una gran variedad de estos modelos que se han empleado en diferentes regiones del mundo y han permitido profundizar el conocimiento respecto al cambio climático y sus posibles impactos futuros y así probar y proponer soluciones viables y adecuadas al contexto socioeconómico y ambiental de cada región de estudio (Hillel & Rosenzweig, 2011; Quiroz *et al.*, 2018; Raymundo *et al.*, 2014, 2016; Rosenzweig *et al.*, 2014).

En Bolivia, los estudios que aplican modelos de simulación para la papa son escasos. Por un lado, Condori *et al.*, (2010) y Condori Mamani, (2005) emplean el modelo SOLANUM para caracterizar los parámetros agrofisiológicos de 10 variedades de papa comúnmente producidas en los andes de Bolivia y estimar el rendimiento potencial en las condiciones agroecológicas de esta región. Por otra parte, Torrico (2018b) emplea el modelo DSSAT, para estudiar posibles opciones de adaptación del cultivo de la papa al cambio climático en escenarios futuros, sin embargo, solo considera en su análisis a un solo cultivar (*Solanum tuberosum ssp. andigenum*), siendo la producción de papa del altiplano boliviano caracterizada su alta diversidad de cultivares, lo que además es considerada una estrategia efectiva para una mayor resiliencia de los sistemas agrícolas (Condori *et al.*, 2014).

¹Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés) son los escenarios desarrollados por el IPCC que proyectan las posibles emisiones y concentraciones futuras de los gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos (IPCC, 2014a).

En este sentido, la necesidad de profundizar y complementar el conocimiento actual y las proyecciones futuras de la producción de papa en Bolivia y evaluar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático de estos sistemas es evidente. Para ello, la aplicación de modelos de simulación con la capacidad de incluir en el análisis a variables relacionadas a escenarios climáticos futuros, concentración de CO_2 , hidrología, crecimiento del cultivo, ciclos de nutrientes y carbono y prácticas de manejo se muestran como una alternativa efectiva para diseñar soluciones viables y adecuadas al contexto agroecológico local considerando los escenarios climáticos futuros de la región altiplánica de Bolivia.

Por lo descrito, la presente investigación se centra en analizar e identificar el impacto en la reducción de la vulnerabilidad al cambio climático de 3 estrategias agrícolas ampliamente recomendadas por expertos en el área y que son una alternativa viable para los pequeños productores y gobiernos locales del altiplano boliviano: Riego complementario, manejo de la diversidad biológica y gestión del calendario agrícola. Empleando el modelo APEX (Agricultural Policy Environmental eXtender) calibrado y validado para condiciones agroecológicas del Altiplano Central (Quezada *et al.*, 2021), se evalúa las estrategias de adaptación de los sistemas agrícolas basados en papa al escenario climático pesimista (RCP.8.5) para el año 2050, con la premisa de que una producción que pueda adaptarse a este escenario, tendrá también alto potencial de ser resiliente en escenarios climáticos menos críticos. Es así que este estudio se centra en la producción en un contexto de cambio climático de 4 cultivares de papa de alta importancia socioeconómica y alimentaria para la región del altiplano: 3 genotipos nativos - *Solanum tuberosum ssp. andigena* (Waycha), *Solanum juzepczukii* (Luki) y *Solanum ajanhuiri* (Ajahuiri) - y un genotipo introducido - *Solanum tuberosum ssp. tuberosum* (Alpha) -.

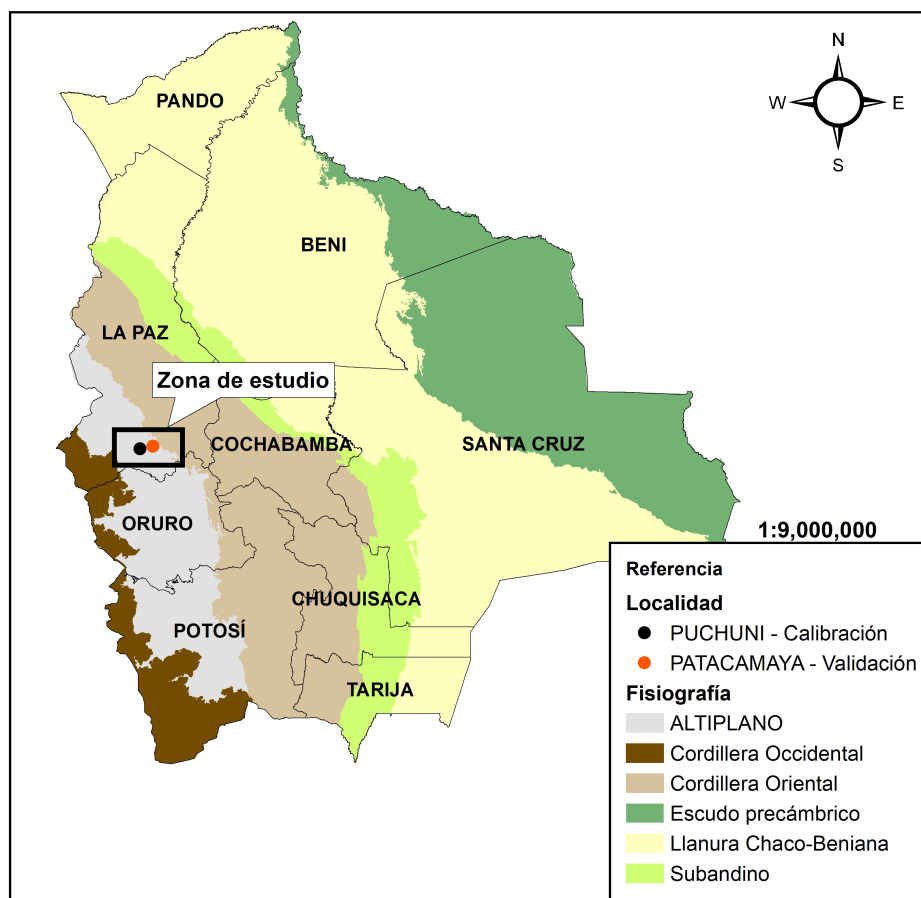
2 Materiales y Métodos

2.1 Zona de estudio

Se emplea el modelo APEX calibrado y validado para las condiciones climáticas y ambientales de las comunidades Patacamaya y Puchuni. Ambas comunidades se sitúan en la zona semiárida del Altiplano Central Boliviano, en la provincia Aroma del departamento de La Paz, entre 3700 y 4000 msnm. La calibración del modelo fue llevada a cabo con los datos secundarios medidos en Puchuni, con temperatura mínima y máxima de 2.4 °C y 17.4 °C, precipitación de 713 mm. Por otra parte, la validación se realizó a partir de los datos medidos en Patacamaya, con temperaturas medias mínima y máxima de 4.6°C y 18.7°C, precipitación de 350 mm. La Figura 1 muestra la ubicación de los sitios empleados para la calibración, validación y estudio de escenarios climáticos y la Tabla 1 contiene los datos generales y el perfil del suelo de cada sitio.

2.2 Descripción del modelo APEX

El modelo APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender), una extensión del modelo EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), es una herramienta capaz de simular procesos medio ambientales relacionados al manejo y uso del suelo en parcelas, granjas o pequeñas cuencas. Entre los procesos que pueden ser estudiados con el modelo se pueden citar a balances hídricos, erosión del suelo, ciclo y pérdida de nutrientes (NPK), pastoreo de ganado, manejo de estiércol, crecimiento de cultivos, entre

Figura 1: Fisiografía de Bolivia y ubicación de la zona de estudio**Tabla 1:** Datos de la zona de estudio y perfil del suelo introducidos al modelo APEX

Componente APEX	Parámetro	Valor	
Sitio	Localidad	Puchuni	Patacamaya
	Periodo	1998-1999	1998-1999
	Latitud	-17.27	-17.23
	Longitud	-68.22	-67.92
	Altitud (msnm)	3950	3789
	Área cultivada (m^2)	25.2	25.2
	Clima	Precipitación, temperatura, y radiación solar diarios	Precipitación, temperatura, y radiación solar diarios
Suelo	Nro. de Capas de suelo	1	1
	Profundidad [cm]	20	20
	Arcilla (%)	9	5
	Arena (%)	41	64
	Limo (%)	50	31
	Densidad aparente (gcm^{-3})	1.38	1.57
	pH	5.5	6.36
	Carbono orgánico (%)	1.05	0.44
	Capacidad de intercambio catiónico ($cmol\ kg^{-1}$)	5.01	5.06

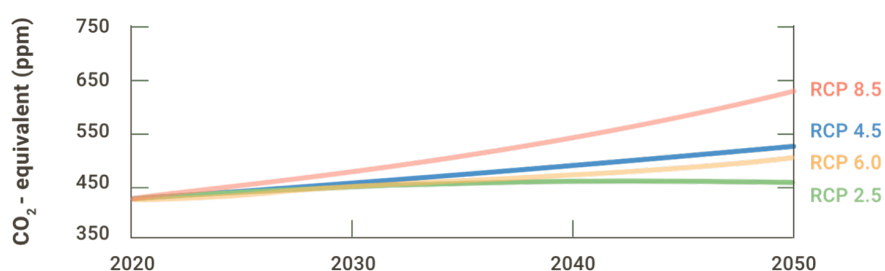
otros (P. W. Gassman *et al.*, 2010). Respecto a este último, es posible emplear el modelo para simular las interacciones e impactos en la producción y rendimiento de cultivos de diferentes factores, como el clima, el suelo, la topografía, así como prácticas de manejo como la rotación de cultivos, fertilización, riego, control de malezas, aplicación de pesticidas, terraceo, franjas de amortiguamiento, todo esto a una escala local (parcelas o granjas enteras) o regional (pequeñas y medianas cuencas) (Le *et al.*, 2018; Luo & Wang, 2019).

APEX es considerado uno de los modelos de simulación de cultivos más importantes en relación a la investigación académica (Asseng *et al.*, 2014; Philip W. Gassman *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2015), y en los últimos años, debido a la capacidad y versatilidad del modelo para simular diferentes procesos ambientales, viene siendo empleado para el estudio de los impactos del cambio climático en la producción agrícola futura en diferentes regiones del mundo (Balkovič *et al.*, 2018; Raymundo *et al.*, 2014; Rinaldi & de Luca, 2012; Xiong *et al.*, 2016).

2.3 Generación de escenarios climáticos

Una de las principales limitaciones a la hora de realizar investigaciones a partir de modelos de simulación de cultivos es la disponibilidad de datos climáticos, y esto resulta aún más complejo si se requiere realizar proyecciones futuras de la producción agrícola. Para que el modelo APEX pueda representar adecuadamente el crecimiento del cultivo de papa en escenarios climáticos futuros se requiere de la generación de datos climáticos diarios de la zona de estudio de al menos 3 parámetros climáticos: precipitación, temperaturas (máxima y mínima) y radiación solar. Para este fin, se emplea el software de modelamiento climático MarkSim (Jones & Thornton, 2002), a partir de su interfaz web. Esta herramienta fue desarrollada y testeada inicialmente para las regiones de Latinoamérica y el Caribe como un modelo estocástico de generador de datos climáticos diarios por investigadores del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), y actualmente ha sido optimizado y se han integrado a la herramienta 17 Modelos de Circulación Global que proyectan futuros escenarios de concentraciones de CO_2 , a partir de los cuales la herramienta es capaz de generar información climática diaria de precipitación, temperatura, radiación solar. En la Figura 2 se muestra el conjunto estandarizado de futuras emisiones de gases de efecto invernadero en representadas en CO_2 equivalente, las cuales son utilizados por los Modelos de Circulación General integrados en la herramienta MarkSim.

Figura 2: Concentración de CO_2 equivalente para cada escenario climático global del IPCC



Se configuró entonces MarkSim para la localidad de Patacamaya para generar datos diarios correspondientes al escenario climático RCP 8.5 (escenario más crítico) para el año 2050. Se seleccionó el

modelo de circulación global HadGEM2-ES, cuyas versiones anteriores fueron validadas para Bolivia (Andrade, 2014). Los datos diarios de precipitación, temperaturas y radiación generados fueron introducidos posteriormente al modelo APEX.

2.4 Calibración y validación del modelo de simulación de cultivos APEX

Como se menciona anteriormente, se emplea el modelo APEX para evaluar y estimar el impacto de 3 estrategias de adaptación al cambio climático para la producción de papa en el altiplano boliviano: aplicación de riego, manejo de la diversidad biológica y gestión del calendario agrícola. Para ello, se utiliza como base un modelo calibrado y validado para las condiciones agroecológicas de estudio para 4 cultivos de papa: dos variedades comerciales – Waycha (nativa) y Alpha (introducida) – y dos variedades nativas para consumo de las familias productoras – Luki y Ajahui (Quezada *et al.*, 2021). No obstante, siguiendo las recomendaciones del estudio antes citado, se complementó la robustez del modelo a partir de la calibración y ajuste de los parámetros que regulan la tolerancia a las bajas temperaturas, esto con base en los límites y rangos estimados por Condori *et al.*, (2014). Una vez ajustados y validados estos parámetros de forma manual, se procedió a evaluar la producción de papa con los datos climáticos generados para el escenario futuro y se estimar el impacto de cada medida de adaptación. Los resultados de este análisis se muestran en el subtítulo siguiente.

3 Resultados

3.1 Calibración y validación de APEX para los cuatro cultivos de papa

Se complementó el modelo validado por Quezada *et al.*, (2021) a partir del ajuste manual de los parámetros del componente CROP.DAT (Steglich *et al.*, 2018) que gobiernan la tolerancia a heladas de los cultivos de papa: FRST1 y FRST2. La calibración fue realizada con los datos medidos en Puchuni, y se logró un ajuste satisfactorio del modelo, cumpliendo con los valores mínimos de los indicadores estadísticos recomendados por Wang *et al.*, (2012): $NSE > 0.55$; $PBIAS$ dentro del 25 % y $R^2 > 0.6$). La Tabla 2 muestra el sesgo entre los rendimientos observados y simulados de tubérculo y biomasa seca para cada cultivar calibrado.

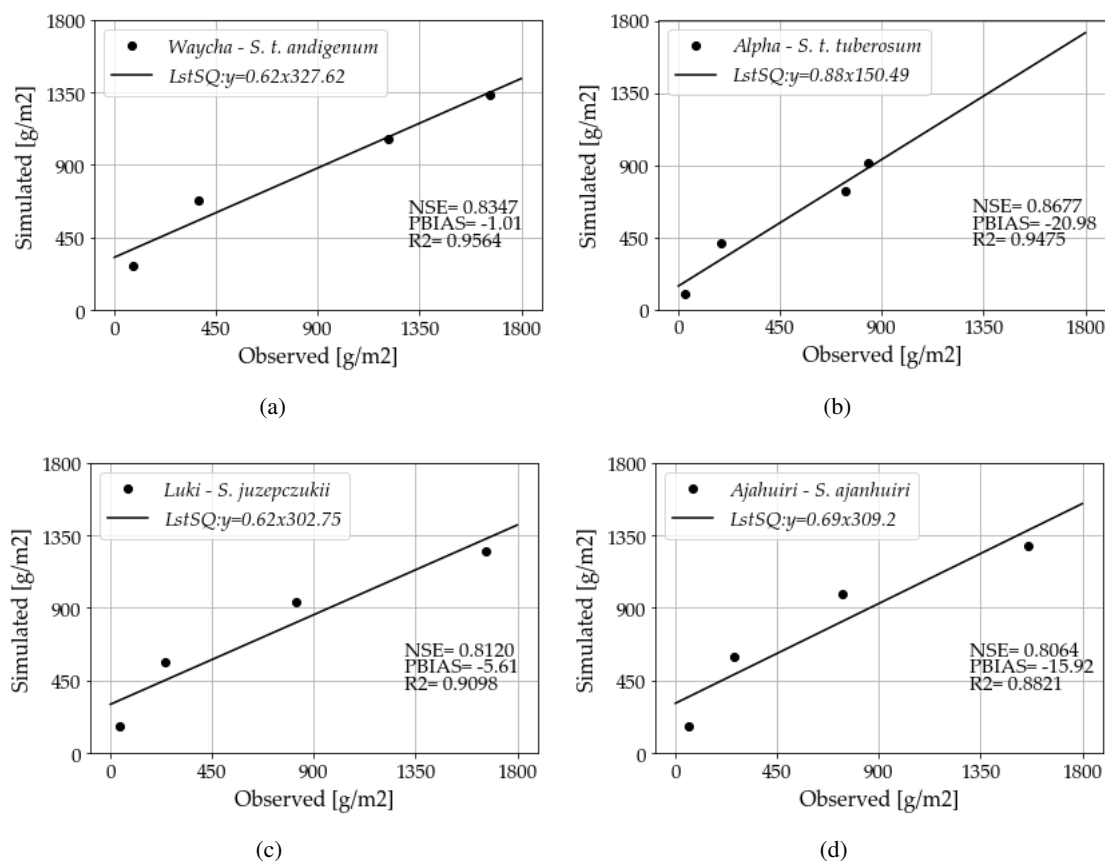
Tabla 2: Rendimientos simulados y observados obtenidos en el proceso de calibración

Cultivar	Tubérculo seco (YLD)			Biomasa seca total (BIOM)		
	Simulado	Observado	PBIAS	Simulado	Observado	PBIAS
Waycha [Tn ha-1]	9.06	10.15	10.74 %	14.48	16.60	12.77 %
Alpha [Tn ha-1]	7.38	6.57	-12.33 %	8.41	8.40	-0.12 %
Luki [Tn ha-1]	10.12	12.17	16.84 %	13.03	16.60	21.51 %
Ajahui [Tn ha-1]	9.81	11.78	16.72 %	13.56	15.60	13.08 %

Por otra parte, la validación fue realizada con datos medidos en Patacamaya. Al igual que en el

proceso de calibración, para la validación se evaluó el desempeño del modelo para simular el crecimiento de las variedades de papa en condiciones climáticas y ambientales del altiplano boliviano a partir de los estadísticos NSE , $PBIAS$ y R^2 , obteniendo los siguientes resultados:

Figura 3: Desempeño del modelo para simular la acumulación de biomasa de los cuatro cultivares de papa en Patacamaya



La Figura 3 permite visualizar claramente que en todos los casos los valores simulados de acumulación de biomasa se ajustan satisfactoria mente a los valores medidos observados por Condori *et al.*, (2010), por lo que el modelo puede ser empleado para evaluar los escenarios climáticos futuros de interés del presente estudio. Es necesario señalar que para los cultivares Waycha, Luki y Ajahui el modelo subestima los rendimientos finales de biomasa seca entre 14% y 21 %, mientras que para el caso del Alpha el modelo sobrestima los rendimientos finales con aproximadamente 15%.

3.2 Escenarios climáticos

Se comparó las variaciones de temperaturas máximas, mínimas y precipitación entre los años 2015 y 2050, este último considerando el escenario climático RCP 8.5. Los resultados obtenidos para la localidad de Patacamaya por la herramienta Marksim a partir del Modelo de Circulación Global HadGEM2-ES, por un lado, muestran que existe un incremento en la temperatura media mínima máxima. Como se muestra en la Tabla 3 y se visualiza en las Figuras 4 y 5, el incremento promedio de la temperatura en ambos casos es de 2°C. Además, la ocurrencia de días con heladas (temperaturas mínimas menores a 0°C), se reduce en un 24 % para el año 2050, y si se considera solamente la época agrícola (Octubre –

Abril), se proyecta un 45 % menos días con heladas para este año. Por otra parte, a partir de la Figura 6 se puede identificar una leve reducción de la precipitación acumulada para el año 2050 (6.6%). Sin embargo, el cambio más importante en términos de producción agrícola sería el patrón de precipitación, el cual muestra una clara variación al comienzo de la época agrícola, con 38 mm menos de lluvia en los meses de octubre (37%), noviembre y diciembre, periodo clave para la tuberización del cultivo de papa, y un incremento de 43 mm de precipitación acumulada en los siguientes meses (19%).

Tabla 3: Datos de la zona de estudio y la práctica de manejo introducidos en el modelo APEX

Variable	Año 2015	Año 2050 (RCP 8.5)	Variación
Temperatura media Máxima	19.8	21.9	2.1 °C
Temperatura media Mínima	1.7	3.7	2.0 °C
Precipitación acumulada	662	621	-6.6 %

Figura 4: Temperaturas Máximas 2015 y 2050 - Patacamaya

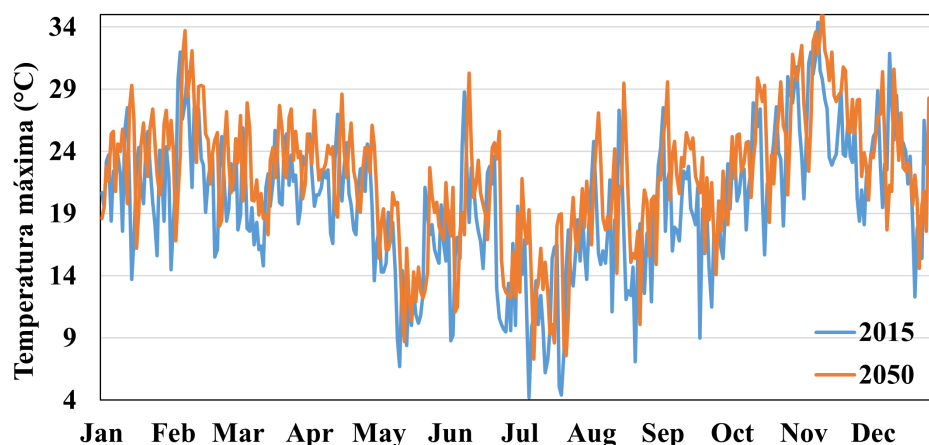


Figura 5: Temperaturas Mínimas 2015 y 2050 - Patacamaya

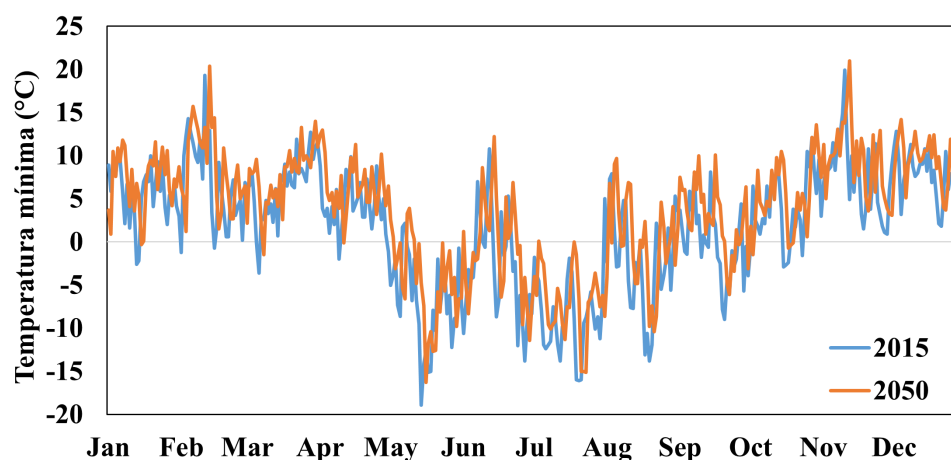
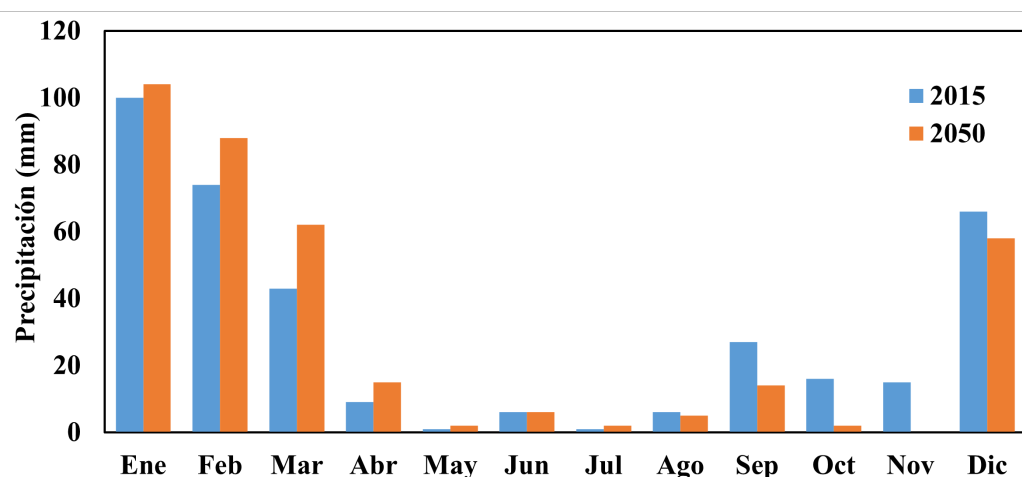


Figura 6: Precipitación acumulada 2015 y 2050 - Patacamaya

3.3 Estrategias de adaptación al Cambio Climático

Inicialmente se evaluó el impacto del cambio climático en la producción sin ninguna medida de adaptación. Para esto, se simuló la producción de los 4 cultivares de papa para los años 2015 y 2050 considerando una producción y manejo agronómico convencional, orientada al monocultivo y los cultivares más comerciales, donde Waycha abarcó el 70 % de la superficie cultivada, Alpha el 20 % y los cultivares nativos Luki y Ajahuiri el 5 % respectivamente. Además se consideró una producción a secano (sin riego), y se estableció las fechas de siembra y cosecha comunes en el altiplano boliviano (mediados de octubre y finales de abril respectivamente) (Canqui & Morales, 2009; Condori *et al.*, 2010; Condori Mamani, 2005). Las prácticas de manejo agronómico “base” y los rendimientos promedio de tubérculo seco obtenidos para los años 2015 y 2050 sin ninguna medida de adaptación son los siguientes:

Tabla 4: Prácticas de manejo y rendimientos promedio de los 4 cultivares de papa sin medidas de adaptación

Fecha	Operación	Cantidad
15-jun	Preparación del terreno (Tractor)	
19-oct	Siembra (Manual)	4.76 planta m-2
19-oct	Fertilización (18-46-00)	261 kg ha-1
22-Dec	Aporque (Tractor)	
22-Dec	Fertilización (46-00-00)	72 kg ha-1
24-ene	Labranza (Manual)	
20-abr	Cosecha (Manual)	Rendimiento tubérculo seco
		2015 = 8.90 kg ha-1 2050 = 7.97 kg ha-1

Los resultados anteriores indican que bajo un sistema agrícola orientado al cultivo de variedades comerciales la producción de papa en altiplano boliviano, bajo el escenario climático más pesimista y sin aplicar ninguna medida de adaptación o mitigación al cambio climático, tendrá una reducción del rendimiento productivo de aproximadamente el 10%, pese al incremento de las temperaturas medias y el aumento de la concentración de CO_2 . En este sentido, y empleando como base para la comparación de rendimientos al valor obtenido anteriormente de 7.97 kg ha^{-1} , a continuación se presentan las estimaciones y proyecciones de la producción de papa para el año 2050 bajo el escenario RCP 8.5, apli-

cando riego, manejo equilibrado de la diversidad biológica y modificación del calendario agrícola como medidas de adaptación a los impactos del cambio climático.

Modificación calendario agrícola

Dados los cambios en los patrones de precipitación presentados en el subtítulo anterior, se postergó las fechas de siembra, fertilización y cosecha 20 días, modificando la fecha de siembra del 19 de octubre al 8 de noviembre y la fecha de cosecha del 20 de abril al 9 de mayo. Manteniendo los porcentajes de superficie de siembra antes descritos para cada cultivar, la aplicación de esta medida tuvo un impacto positivo en los rendimientos productivos, con un incremento promedio de un 28 % (10.19 Tn ha^{-1}).

Manejo diversidad biológica

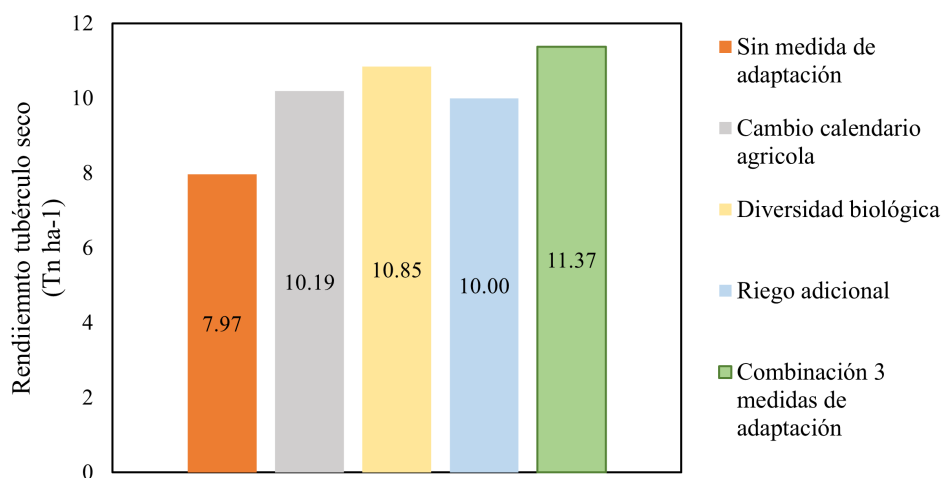
Para aplicar esta medida, se modificó distribución de superficie de siembra considerando las características y tolerancia al clima y fenómenos naturales de cada cultivar. Se mantuvo la orientación hacia el cultivo de la variedad más comercial e importante para la economía familiar, se incrementó la superficie de siembra para las variedades nativas y se redujo significativamente la superficie destinada al cultivar más vulnerable al clima del altiplano, Alpha, resultando en la siguiente distribución espacial: Waycha = 40 %, Alpha = 4 %, Luki = 28 % y Ajahui = 28 %. Los resultados de la implementación de esta medida se traducen en un incremento en el rendimiento promedio de papa del 36 % (10.85 Tn ha^{-1}), el mayor en comparación con el resto de las medidas evaluadas.

Riego adicional

Uno de los factores que más impacto tiene en la producción de papa es la disponibilidad de agua principalmente entre la fase de tuberización y maduración del cultivo. Es así que esta medida se muestra como necesaria en un contexto de cambio climático para el 2050, el cual, si bien no parece mostrar cambios significativos en la disponibilidad de agua, el incremento de las temperaturas aumenta la evapotranspiración de las plantas y, por lo tanto, el requerimiento de la aplicación de riego suplementario. Se integró entonces al modelo APEX riego en volúmenes de 22 mm y 12 mm, la primera al inicio de la tuberización y la segunda comenzando la maduración, (25 de octubre y 29 de diciembre, respectivamente). Los resultados de las simulaciones de APEX corroboran lo antes descrito, logrando un rendimiento promedio de tubérculo seco un 25 % mayor al rendimiento obtenido sin ninguna medida de adaptación (10 Tn ha^{-1}).

Combinación de las medidas de adaptación

Hasta este punto cada una de las medidas evaluadas muestran efectividad para lograr una mayor resiliencia y adaptación al escenario climático RCP 8.5 de los sistemas agrícolas basados en papa del altiplano boliviano, siendo el manejo de la diversidad biológica la medida de adaptación con mejores resultados, y la aplicación de riego la que presentó el menor incremento del rendimiento. En este sentido, se evaluó la combinación de las tres medidas de adaptación, obteniendo el promedio de rendimiento más alto, con un valor de 11.37 Tn ha^{-1} , lo que se traduce en un incremento del 45 % en comparación con la producción sin ninguna medida de adaptación para el año 2050, y un rendimiento 28 % mayor a los obtenidos en las condiciones climáticas actuales (2015). La Figura 7 presenta una comparación de los rendimientos sin medidas de adaptación, después de la aplicación de cada medida por separado y finalmente después de combinar las tres medidas consideradas en este estudio.

Figura 7: Rendimientos de papa promedio para cada medida de adaptación al cambio climático

4 Discusión

Con base en un modelo previamente calibrado y validado, se complementó la robustez del modelo de simulación de cultivos APEX para representar el proceso de crecimiento de 4 cultivares de papa en las condiciones agroecológicas del Altiplano Central boliviano. Se ajustó los parámetros de crecimiento de cultivo (CROP.DAT) del modelo relacionados a las temperaturas y tolerancia a heladas (FRST 1 y FRST 2) y se obtuvo un desempeño satisfactorio de este en el proceso de calibración llevado a cabo con datos de campo medidos en Puchuni para la campaña agrícola de 1998 y 1999. El proceso de validación posterior del modelo fue desarrollado con datos medidos en Patacamaya para el mismo periodo, y el ajuste entre los datos observados y simulados de acumulación de biomasa cumplieron con los indicadores estadísticos recomendados por Wang *et al.*, (2012) - $NSE > 0.55$; $PBIASdentro del 25\%$ y $r^2 > 0.6$ —, lo que dio paso a la utilización del APEX para evaluar la producción de papa en esta región bajo escenarios climáticos futuros.

Al respecto, empleando la herramienta Marksim y el modelo de circulación global HadGEM2-ES se generó datos climáticos diarios para el año 2050 para la localidad de Patacamaya bajo el escenario climático más pesimista RCP 8.5, el cual fue desarrollado por el IPCC y presentado en uno de sus últimos informe (IPCC, 2014b). Los resultados obtenidos estiman un incremento de las temperaturas medias mínima y máxima de aproximadamente 2°C para el sitio de estudio y una leve variación de la precipitación acumulada. Sin embargo, el patrón de precipitación presenta un cambio marcado, reduciendo la precipitación en más de 1/3 en los meses de octubre y noviembre principalmente, los cuales son clave para el inicio de la tuberización de la papa, proceso que demanda disponibilidad de agua. Finalmente, en el escenario estudiado, para el año 2050 la concentración de CO_2 será casi el doble que la actual, alcanzando el valor de 650 ppm.

Considerando este escenario, se simuló la producción de papa en Patacamaya sin aplicar ninguna medida de adaptación al cambio climático y orientando la producción hacia el monocultivo de las variedades más comerciales, donde Waycha y Alpha abarcaron más del 90% de la superficie cultivada. Los

rendimientos obtenidos bajo estas condiciones fueron 10 % menos que los rendimientos de papa en las condiciones climáticas actuales (año 2015). En contraposición a estos resultados un estudio previo llevado a cabo por Torrico, (2018b), que evalúa la producción de papa en escenarios climáticos futuros en localidades del Altiplano Norte, concluye que los rendimientos de la variedad Waycha incrementarían a causa del incremento de temperaturas y principalmente por el aumento de las concentraciones de CO_2 .

Esta diferencia entre resultados puede deberse a que el estudio antes mencionado fue llevado a cabo en zonas con mayor precipitación y humedad, como Belén, la cual se encuentra cerca al lago Titicaca, mientras que la localidad de Patacamaya se caracteriza por ser una zona más seca y con baja humedad. Por otro lado, Torrico (2018b) también determina que el cambio de fechas de siembra y cosecha no tiene un impacto significativo en los rendimientos, por lo que podría concluirse que en esta zona las variaciones de los patrones de precipitación no serán tan marcadas como en el Altiplano Central. En efecto, los resultados de las simulaciones de APEX para Patacamaya muestran que la modificación y postergación en 20 días de las fechas de siembra, fertilización y cosecha de papa incrementan los rendimientos en un 28 % en comparación con los rendimientos obtenidos sin la aplicación de ninguna medida.

La segunda medida de adaptación evaluada fue el manejo de la diversidad biológica en los sistemas agrícolas basados en papa. Para ello, se consideró una producción de papa más equilibrada en cuanto a la siembra variedades, pero todavía orientada al cultivo de la variedad más importante para la economía familiar, la Waycha. La distribución de variedades seleccionada se basó en estudios previos que obtuvieron buenos resultados en términos de resiliencia climática y rendimientos productivos (Canqui & Morales, 2009; Condori *et al.*, 2014), donde las variedades nativas Waycha, Luki y Ajahuiri abarcaron más del 95 % de la superficie cultivada. Gracias a la aplicación de esta medida los rendimientos productivos incrementaron en un 36 %, siendo estos los mejores rendimientos obtenidos en comparación con el resto de las medidas aplicadas. Adicionalmente, cabe resaltar que al incluir en el sistema agrícola una mayor presencia de variedades nativas mejor adaptadas al contexto climático y ambiental local se logra una mayor resiliencia de estos sistemas, y por lo tanto, menores pérdidas económicas a causa de plagas, enfermedades y fenómenos naturales extremos como las heladas (Condori *et al.*, 2014; Quiroz *et al.*, 2018).

La última medida de adaptación evaluada fue la aplicación de riego suplementario. Los volúmenes de agua aplicados fueron de 22 mm el 22 de octubre (después de la siembra), y de 12 mm el 29 de diciembre (inicio maduración). Si bien los resultados obtenidos para esta medida presentan los rendimientos más bajos en comparación con la implementación de las dos anteriores medidas, el incremento de los rendimientos es bastante bueno si se compara con los rendimientos base (sin medidas), con un aumento del 25 %. Si comparamos este valor en términos tubérculo húmedo el rendimiento obtenido con riego suplementario es de 40 Tn ha^{-1} , mientras que el rendimiento sin ninguna medida de adaptación llega a 31 Tn ha^{-1} , es decir, 9 toneladas por hectárea menos, valor mucho mayor al rendimiento promedio nacional actual (5.7 Tn ha^{-1} de tubérculo húmedo).

Finalmente, se simuló la producción de papa integrando las tres medidas de adaptación. Por lo tanto, se movió las fechas de siembra y cosecha al 8 de noviembre y 9 de mayo respectivamente, se aplicó riego solamente una vez el 20 de enero a razón de 15 mm y se estableció la superficie de siembra con Waycha abarcando el 40 %, Alpha el 4 %, Luki el 28 % y Ajahuiri el 28 %. Esta combinación de medidas permitió obtener un rendimiento de 11.37 Tn ha^{-1} de tubérculo seco, o lo que es lo mismo, un rendimiento de 46

Tn ha^{-1} de tubérculo húmedo, siendo estos rendimientos los más altos en comparación con la aplicación del resto de medidas por separado; un 43 % más que los rendimientos sin medidas de adaptación para el año 2050, y 31 % más en comparación con los rendimientos obtenidos en el año 2015.

Se ha visto entonces que los sistemas alimentarios basados en papa cumplen un importante rol para asegurar la seguridad alimentaria de una gran parte de las familias del altiplano boliviano. Los impactos del cambio climático representan una amenaza a estos sistemas y actualmente la agricultura familiar es altamente vulnerable. Se estima que esta situación puede agravarse en el futuro, especialmente si los gobiernos no toman las medidas adecuadas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la resiliencia de los países. No obstante, la implementación de medidas de adaptación evaluadas en este estudio, de relativo bajo costo y accesibles para los pequeños agricultores y gobiernos locales, pueden incrementar la resiliencia de estos sistemas, reducir las pérdidas de papa a causa de eventos climáticos extremos y adaptarse mejor a escenarios futuros, incluso al más pesimista. Además, características y calidad del suelo, así como el manejo de nutrientes en los experimentos de campo en los que se basa el modelo calibrado fue bastante óptimo y adecuado al requerimiento de los cultivares de papa para que estos alcancen los rendimientos potenciales. En este sentido, para lograr que las medidas de adaptación evaluadas en el presente estudio sean efectivas, es necesario acompañarlas de un adecuado manejo del suelo, la erosión y fertilización, así como el control de plagas y enfermedades, las cuales serán más comunes a medida que la temperatura aumente en la región.

5 Conclusiones

Pese al incremento de la temperatura y concentración de CO_2 , se estima que en el Altiplano Central boliviano los rendimientos de papa en el contexto del peor escenario climático para el año 2050 reduzcan en un 10 %, incluso con un manejo adecuado de nutrientes. Esto se debe principalmente a la variación en los patrones de precipitación. Por otro lado, si los productores de papa integran medidas de adaptación al cambio climático como la postergación de las fechas de siembra, fertilización y cosecha; el manejo equilibrado de variedades de papa priorizando las variedades nativas; y la aplicación de riego suplementario, los rendimientos productivos incrementarían en un 48 %. Además, estas medidas ayudarían a reducir las pérdidas de papa a causa de eventos extremos como heladas o incidencia de plagas, los cuales son potenciados por el cambio climático. Finalmente, con sistemas agrícolas basados en papa más resilientes y con rendimientos que permitan competir con las importaciones de papa, se aportaría a la mejora de la seguridad alimentaria en la región altiplánica de Bolivia.

Referencias

- Andrade, M. F. (2014). La Economía del cambio climático en Bolivia. Validación de modelos climáticos. In C. E. Ludeña L. Sánchez (Eds.). *Banco Interamericano de Desarrollo* (Issue Monografía del BID, 184). Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad, https://www.mendeley.com/catalogue/90833827-7f9c-3c83-8f6a-76ab18ac01e4/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.4&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B5a3ad8c0-099a-41a5-b530-042f980e62ab%7D
- Asseng, S., Zhu, Y., Basso, B., Wilson, T., Cammarano, D. (2014). Simulation Modeling: Applications in Cropping Systems. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 102–112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00233-3>
- Azeñas, V., Benavides, J. P. (2020). Análisis de la cadena alimentaria de la papa: ¿Impulsa o dificulta el acceso y la disponibilidad de alimentos en las familias de agricultores? Un estudio de caso en comunidades rurales del municipio Batallas-departamento de La Paz (Bolivia) Mesa, In *II Congreso Virtual Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales “Soluciones Ambientales en el Marco de la Emergencia Climática”* (pp. 1–16). Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios.
- Balkovič, J., Skalský, R., Folberth, C., Khabarov, N., Schmid, E., Madaras, M., Obersteiner, M., van der Velde, M. (2018). Impacts and Uncertainties of +2°C of Climate Change and Soil Degradation on European Crop Calorie Supply. *Earth's Future*, 6(3), 373–395. <https://doi.org/10.1002/2017EF000629>
- BDP. (2019). *Mapa de complejidades*. Banco de Desarrollo Productivo. <https://complejidades.bdp.com.bo/mapa>
- Canqui, F., Morales, E. (2009). *Conocimiento Local en el Cultivo de la Papa*. Fundación PROIMPA.
- Choruma, D., Balkovic, J., Odume, O. N. (2019). Calibration and validation of the EPIC model for maize production in the Eastern Cape, South Africa. *Agronomy*, 9(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090494>
- Condori-Mamani, P., Loza-Murguía, M. G., Sainz-Mendoza, H. N., Guzmán-Calla, J., Mamani-Pati, F., Marza-Mamani, F., Gutiérrez-González, D. E. (2017). Evaluación del efecto del biol sobre catorce accesiones de papa nativa (*Solanum* spp.) en la estación experimental kallutaca. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 5(1), 15–28. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2017.050100015>
- Condori, B., Hijmans, R. J., Ledent, J. F., Quiroz, R. (2014). Managing potato biodiversity to cope with frost risk in the high Andes: A modeling perspective. *PLoS ONE*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081510>
- Condori, B., Hijmans, R. J., Quiroz, R., Ledent, J. F. (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling. *Field Crops Research*, 119(1), 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.003>
- Condori, B., Mamani, P., Botello, R., Patiño, F., Devaux, A., Ledent, J. F. (2008). Agrophysiological characterisation and parametrisation of Andean tubers: Potato (*Solanum* sp.), oca (*Oxalis tuberosa*), isaño (*Tropaeolum tuberosum*) and papalisa (*Ullucus tuberosus*). *European Journal of Agronomy*, 28(4), 526–540. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.002>
- Condori Mamani, J. (2005). *Validación del modelo de simulación Lintul para cuantificar el rendimiento potencial de diferentes especies de papa en el Altiplano central - La Paz*. Universidad Mayor de

San Andrés.

- FAO. (2021). *FAOSTAT: Cultivos*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fundación TIERRA. (2019). *Efectos de importación de alimentos sobre la producción campesina-indígena*.
- Gassman, P. W., Williams, J. R., Wang, X., Saleh, A., Osei, E., Hauck, L. M., Izaurralde, R. C., Flowers, J. D. (2010). The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. *Transactions of the ASABE*, 53(3), 711–740.
- Gassman, Philip W., Williams, J. R., Benson, V. W., Izaurralde, R. C., Hauck, L. M., Jones, C. A., Atwood, J. D., Kiniry, J. R., Flowers, J. D. (2004). Historical development and applications of the EPIC and APEX models. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 2033–2064. <https://doi.org/10.13031/2013.17074>
- Hillel, D., Rosenzweig, C. (2011). HANDBOOK OF CLIMATE CHANGE AND AGROECOSYSTEMS Impacts, Adaptation, and Mitigation. In *ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation* (Vol. 1, Issue 11531). Imperial College Press. <https://doi.org/10.1142/p876>
- Hoffmann, D., Requena, C. (2012). *Bolivia en un mundo 4 grados más caliente*.
- IPCC. (2014a). Anexo II: Glosario. *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, 127–141.
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jones, P. G., Thornton, P. K. (2002). *MarkSim User Manual Version 1*.
- Kephe, P. N., Ayisi, K. K., Petja, B. M. (2021). Challenges and opportunities in crop simulation modelling under seasonal and projected climate change scenarios for crop production in South Africa. *Agriculture and Food Security*, 10(1), 1–24. <https://doi.org/10.1186/s40066-020-00283-5>
- Keulen, V. (2013). Simulation Models as Tools for Crop Management. In P. Chirstou, R. Savin, B. A. Costa-Pierce, I. Miztal, W. C.B.A (Eds.), *Sustainable Food Production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8>
- Le, K. N., Jeong, J., Reyes, M. R., Jha, M. K., Gassman, P. W., Doro, L., Hok, L., Boulakia, S. (2018). Evaluation of the performance of the EPIC model for yield and biomass simulation under conservation systems in Cambodia. *Agricultural Systems*, 166 (July), 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.08.003>
- Luo, Y., Wang, H. (2019). Modeling the impacts of agricultural management strategies on crop yields and sediment yields using APEX in Guizhou Plateau, southwest China. *Agricultural Water Management*, 216(April 2018), 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.018>
- Luque Salcedo, M. (2018). *Caracterización de parámetros vulnerables de 50 variedades de papa nativa (Solanum sp.) en dos comunidades del Municipio de Batallas*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Perez, C., Nicklin, C., Sherwood, S., Vanek, S., Forbes, G., Dangles, O., Garrett, K. A., Halloy, S. (2010). Climate Change in the High Andes:: Implications and Adaptation Strategies for Small-scale Farmers. *The International Journal of Environmental, Cultural, Economic, and Social Sustainability: Annual Review*, 6(5), 71–88. <https://doi.org/10.18848/1832-2077/cgp/v06i05/54835>
- Pinto, M. R. (2010). Vulnerabilidad de los medios de vida ante el cambio climático en Bolivia. *LIDEMA*, 40.

- Prudencio, J. (2012). *Seguridad alimentaria: Promoviendo un debate necesario*. COSUDE.
- Prudencio, J. (2020). *ESTRATEGIA NACIONAL DE DESARROLLO DE LA AGRICULTURA FAMILIAR SUSTENTABLE JULIO*. FAO.
- Quezada, C., Osorio, J., Benavides, J. P. (2021). Calibración y validación del modelo APEX para tres cultivares de papa producidos en la región andina boliviana. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*.
- Quiroz, R., Ramírez, D. A., Kroschel, J., Andrade-Piedra, J., Barreda, C., Condori, B., Mares, V., Monneveux, P., Perez, W. (2018). Impact of climate change on the potato crop and biodiversity in its center of origin. In *Open Agriculture* (Vol. 3, Issue 1, pp. 273–283). <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0029>
- Raymundo, R., Asseng, S., Cammarano, D., Quiroz, R. (2014). Potato, sweet potato, and yam models for climate change: A review. *Field Crops Research*, 166, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.017>
- Raymundo, R., Asseng, S., Prasad, R., Kleinwechter, U., Concha, J., Condori, B., Bowen, W., Wolf, J., Olesen, J. E., Dong, Q., Zotarelli, L., Gastelo, M., Alva, A., Travasso, M., Quiroz, R., Arora, V., Graham, W., Porter, C. (2016). Performance of the SUBSTOR-potato model across contrasting growing conditions. *Field Crops Research*, 202, 57–76. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.012>
- Rinaldi, M., de Luca, D. (2012). Applications of EPIC model to assess climate impact on sorghum in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 7(1), 74–85. <https://doi.org/10.4081/ija.2012.e12>
- Rojas Mamani, P., Ledent - Francois, J. (2014). Efecto de la sequía en la morfología, crecimiento y productividad de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Bolivia. *Revista Latinoamericana de La Papa*, 18(1).
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Saavedra, A. K., Delgado, J. A., Botello, R., Mamani, P., Alwang, J. (2014). A new n index to assess nitrogen dynamics in potato (*Solanum tuberosum* L.) production systems of Bolivia. *Agrociencia*, 48(7), 667–678.
- Steglich, E. M., Osorio, J., Doro, L., Jeong, J., Williams, J. R. (2018). *Agricultural Policy Environmental Extender Model-User's Manual Version 1501*. Texas AM Agrilife Research.
- Tito Velarde, C., Wanderley, F. (2021). Contribución de la agricultura familiar campesina e indígena a la producción y consumo de alimentos en Bolivia. In *Cuadernos de Investigación N° 91*. CIPCA.
- Torrico, J. C. (2018a). La Seguridad Agro-Alimentaria frente al Cambio Climático en Bolivia. *ANÁLISIS AGRARIO*, 2018(1).
- Torrico, J. C. (2018b). Vulnerabilidad y opciones de adaptación del cultivo papa (*Solanum tuberosum* L.) al cambio climático para condiciones de altiplano. *CienciAgro*, 1, 1–14.
- Wang, X., Kemanian, A. R., Williams, J. R. (2015). *Special Features of the EPIC and APEX Modeling Package and Procedures for Parameterization, Calibration, Validation, and Applications*. 16802, 177–208. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel2.c6>
- Wang, X., Williams, J. R., Gassman, P. W., Baffaut, C., Izaurralde, R. C., Jeong, J., Kiniry, J. R. (2012). EPIC and APEX: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4),

1447–1462. <https://doi.org/10.13031/2013.42253>

Xiong, W., Skalský, R., Porter, C. H., Balkovič, J., Jones, J. W., Yang, D. (2016). Calibration-induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on global maize yield. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(3).