



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE LA PAPA UTILIZANDO EL MODELO AQUACROP,
DISTRITO DE AZANGARO – PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JESUS YOSEF PUMA CAHUA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo mi corazón a mi querida madre, Esther N. Cahua Villasante, su bendición todos los días a lo largo de mi vida me protege y me conduce por el camino del bien, le doy el presente por su paciencia, cariño y sacrificio propio de amor de madre.

Jesus Yosef Puma Cahua



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, nuestra primera casa de estudios, en especial a la Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola que por medio de su plana docente impartieron sus conocimientos en mi persona para mi formación profesional.

Al D.Sc. Germán Belizario Quispe, y M.Sc. Wilber Fermín Laqui Vilca, a quienes expreso sinceridad y afecto agradecimiento por su apoyo, valiosas enseñanzas y correcciones han conformaron el pilar fundamental de este trabajo de investigación.

A mi compañera de vida Yasmit Gonzales G., su ayuda incondicional en todo momento ha contribuido en este presente trabajo.

Jesus Yosef Puma Cahua



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 16

ABSTRACT..... 17

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 21

1.2.1. Problema general 21

1.2.2. Problemas específicos 21

1.3. ANTECEDENTES..... 21

1.3.1. Antecedentes internacionales..... 21

1.3.2. Antecedentes nacionales 24

1.4. JUSTIFICACIÓN..... 29

1.5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN 29

1.5.1. Hipótesis general..... 29

1.5.2. Hipótesis específicas 30

1.6. OBJETIVOS 30

1.6.1. Objetivo general..... 30

1.6.2. Objetivos específicos 30



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO.....	31
2.1.1. Cambio climático	31
2.1.2. Coeficientes de un cultivo.....	42
2.1.3. Coeficiente de estrés hídrico de cultivo (Ks).....	45
2.1.4. Relación de productividad del cultivo y estrés hídrico.....	48
2.1.5. Modelo AquaCrop	49
2.1.6. Procedimientos para la modelación en AquaCrop.....	59
2.1.7. Balance hídrico de la zona radicular	67

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO	70
3.1.1. Lugar experimental	70
3.1.2. Ubicación política	70
3.1.3. Ubicación geográfica	70
3.1.4. Antecedente histórico de cultivo del campo experimental	71
3.1.5. Condición hidro climática.....	71
3.1.6. Condición de agua, terreno y suelo.....	75
3.2. MATERIAL EXPERIMENTAL.....	78
3.2.1. Material genético	78
3.2.2. Materiales de escritorio.....	79
3.2.3. Materiales y equipos de campo y gabinete	79
3.3. METODOLOGÍA.....	80
3.3.1. Rendimiento de cultivos	82



3.3.2. Rendimiento del cultivo de la papa.....	83
3.3.3. AquaCrop como modelo de simulación.....	84
3.3.4. Descripción de módulo y parámetros a implementar	88
3.3.5. Módulo de clima.	89
3.3.6. Módulo de cultivo	90
3.3.7. Módulo de suelo.....	97
3.3.8. Módulo de riego.....	97
3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	107
3.5. VALIDACIÓN DE AQUACROP	107
3.6. PROYECCIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO ...	108
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. RESULTADOS	114
4.1.1. Caracterización climática de la zona en estudio	114
4.1.2. Desempeño del modelo en el cultivo.....	119
4.1.3. Proyección y evaluación del efecto del cambio climático en el rendimiento de la papa para el periodo 2023 – 2050.....	143
4.2. DISCUSIÓN	164
V. CONCLUSIONES.....	167
VI. RECOMENDACIONES	170
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
ANEXOS.....	183
Anexo 1: Valores de proyección de datos.....	183
Anexo 2: Resultados de la caracterización climática de la zona en estudio	188
Anexo 3: Dosel simulado en periodo vegetativo	236



Anexo 4: Panel fotográfico 237

ÁREA: Recursos hídricos

TEMA: Impacto ambiental

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de octubre de 2022



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características de los escenarios de emisión de dióxido de carbono para las rutas 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m ² de forzante radiativa al 2100.....	33
Tabla 2.	Modelos climáticos globales (GCMs) HadGEM2, CanESM2 y MIROC5 utilizados para la reducción de escala estadística de escenarios climáticos.	40
Tabla 3.	Criterios para seleccionar el coeficiente único y dual.	42
Tabla 4.	Datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial que corresponden a la campaña agrícola 2017 – 2018 según la estación Azángaro.....	75
Tabla 5.	Características de campo experimental.....	77
Tabla 6.	Herramientas software empleados para la presente investigación.....	80
Tabla 7.	Cultivos calibrados previamente para AquaCrop.	88
Tabla 8.	Entidades que proporcionaron data para el proceso de ajuste para validar y aplicar el módulo de cultivo.....	98
Tabla 9.	Módulos de AquaCrop.....	101
Tabla 10.	Calificación de la eficiencia de modelación según el índice de Nash – Sutcliffe (E).....	105
Tabla 11.	Cobertura del Dosel promedio de los 19 muestreos realizados con 3 repeticiones por muestreo, evaluados a 24 plantaciones.	116
Tabla 12.	Longitud de raíz determinada en muestreos con tres repeticiones.....	118
Tabla 13.	Características de suelo.....	119
Tabla 14.	Prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores medios del dosel observado con la simulada.	121
Tabla 15.	Evaluación de eficiencia de la modelación del dosel: Calibración con lámina óptima (T ₀) y validación con lámina reducida (T ₁).....	122



Tabla 16. Evaluación de eficiencia de la modelación de biomasa seca aérea: Calibración con lámina óptima (T0) y validación con lámina reducida (T1).	125
Tabla 17. Comparación de biomasa aérea seca (Tn/ha) estimada en la cosecha (27 de abril de 2018) y la simulación por el modelo agrometeorológico AquaCrop en cada experimento.	126
Tabla 18. Rendimiento promedio en peso fresco de la papa variedad Imilla Negra por cada experimento:	127
Tabla 19. Comparación del rendimiento al momento de la cosecha a peso seco (27 de abril de 2018) y el rendimiento simulado.	127
Tabla 20. Simulación de rendimientos en AquaCrop y rendimientos promedio anual observado de papa.	128
Tabla 21. Resultados de la prueba T-Student	131
Tabla 22. Indicadores estadísticos del ajuste de la evapotranspiración, ecuación Hargreaves en función a Penman – Monteith para condiciones de Azángaro.	143
Tabla 23. Precipitación estimada media mensual (2023 - 2050) y variación respecto a la media histórica mensual (Del año 1975 al 2005) - estación Azángaro..	146
Tabla 24. Variación porcentual de proyecciones de temperatura máxima mensual respecto al histórico mensual.	151
Tabla 25. Variación porcentual de proyecciones de temperatura mínima mensual respecto al histórico mensual.	154
Tabla 26. Variación porcentual de evapotranspiración proyectada versus histórica para el lugar de estudio.	158
Tabla 27. Rendimientos máximos y mínimos simulados, periodo 2023-2050.	163



Tabla 28. Variación porcentual de rendimiento simulado 2023 – 2050 respecto al
rendimiento histórico simulado periodo 2006 - 2021..... 164



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cambio de la temperatura media mundial media del modelo para el escenario de altas emisiones	34
Figura 2. Variación de las precipitaciones y temperaturas medias, para los periodos 1986 - 2005 y 2081 - 2100.....	35
Figura 3. Estructura esquemática de un GCM.	36
Figura 4. Perspectiva 2 del diseño esquemático de los GCM	37
Figura 5. Etaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.	39
Figura 6. Proyecciones climáticas con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000.....	39
Figura 7. Evapotranspiración del cultivo (Ciclo del agua clásico).....	44
Figura 8. Curva del coeficiente dual del cultivo.	45
Figura 9. Estrés hídrico (Ks) para niveles de agotamiento en la zona de raíz (Dr).....	47
Figura 10. Diferencia en los coeficientes para cada proceso.	48
Figura 11. Esquema básico del modelo AquaCrop.	51
Figura 12. Diagrama de flujo del modelo agrometeorológico AquaCrop.....	53
Figura 13. Esquema de cálculo general del modelo AquaCrop.	57
Figura 14. Representación esquemática de las etapas fenológicas del cultivo en AquaCrop.....	65
Figura 15. Zona radicular expresada como un reservorio.	68
Figura 16. Ubicación de la zona en estudio.....	70
Figura 17. Lugar de estudio, parcela de cultivo de papa en la C.C San Martín del distrito de Azángaro.	71



Figura 18. Datos de temperatura máxima mensual para la serie histórica de 1987 a 2018 - estación Azángaro.....	72
Figura 19. Datos de temperatura mínima mensual para la serie histórica de 1987 a 2018 - estación Azángaro.....	73
Figura 20. Datos de precipitación mensual en mm para la serie histórica de 1987 a 2018 - estación Azángaro.....	74
Figura 21. Disposición estructural de parcelas experimentales (3 parcelas).....	77
Figura 22. Características del periodo vegetativo de la papa.	79
Figura 23. Esquema de la metodología utilizada.	81
Figura 24. Diagrama de ajuste del modelo AquaCrop.	81
Figura 25. Interfaz principal del programa AquaCrop 6.1.	85
Figura 26. Algunas variables del módulo de cultivo, elaborado en base a las ventanas del software.	86
Figura 27. Distribución de plantas y tamaño muestral.....	91
Figura 28. Medición de cobertura dosel.....	92
Figura 29. Escala y delimitación de cobertura dosel con el software AutoCAD.....	93
Figura 30. Cálculo de cobertura Dosel en % (CC%).	93
Figura 31. Gráfico de CC vs días después de la siembra DDS.	94
Figura 32. Proceso de obtención de biomasa seca de cultivo.	96
Figura 33. Esquema de ajuste del modelo AquaCrop.	99
Figura 34. Etapas del cultivo en periodo vegetativo.	115
Figura 35. Cobertura Dosel del cultivo de papa en la campaña agrícola.	117
Figura 36. Curva simulada con lámina reducida pluvial.....	124
Figura 37. Variación temporal de la biomasa aérea seca (Ton/ha). experimento con lámina reducida.....	126



Figura 38. Simulación periodo año 2018.	129
Figura 39. Simulación periodo año 2019.	129
Figura 40. Simulación periodo año 2020.	130
Figura 41. Rendimientos obtenidos 2017-2020.	131
Figura 42. Temperatura máxima, media y mínima, sobre días después de la siembra.	132
Figura 43. Precipitación pluvial en milímetros sobre días después de la siembra.	133
Figura 44. Precipitaciones pluviales en el período enero 2017 a diciembre del 2020.	133
Figura 45. Evapotranspiración de referencia (Eto).	134
Figura 46. Balance de agua en el suelo.	135
Figura 47. Temperatura del aire (enero 2017 a diciembre 2020).	136
Figura 48. Concentración de CO ₂ en la atmósfera, en la zona en estudio	137
Figura 49. Descripción de la estación meteorológica de Azángaro.	138
Figura 50. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2017.	139
Figura 51. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2018.	139
Figura 52. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2019.	140
Figura 53. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2020.	141
Figura 54. Barras de precipitación pluvial y evapotranspiración durante el periodo vegetativo de cultivo.	141
Figura 55. Humedad Relativa y Radiación solar extraterrestre.....	142
Figura 56. Correlación lineal de la evapotranspiración estimada por Hargreaves y Penman – Monteith para condiciones de Azángaro.....	143
Figura 57. Promedios de precipitación 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de	



precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.	145
Figura 58. Precipitación acumulada anual para el periodo 2023-2050 para 6 modelos de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.	148
Figura 59. Promedios Tmax 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.	150
Figura 60. Promedios de Tmin, 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.	153
Figura 61. Promedios de evapotranspiración, 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo 2006 - 2021 en la estación Azángaro.	157
Figura 62. Evapotranspiración anual para el periodo 2023-2050 para 6 modelos de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.	159
Figura 63. Rendimiento de cultivo anual para el periodo 2023-2050 para 6 escenarios de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.	161



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

DRA	: Dirección Regional Agraria
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
T°	: Temperatura
°C	: Grados centígrados
T° max	: Temperatura máxima
T° min	: Temperatura mínima
T°media	: Temperatura media
CRU	: Unidad de Investigación de Clima
NSE	: Eficiencia de Nash-Sutcliffe, eficiencia de modelo predictivo.
CMIP	: Coupled Model Intercomparison Project, (Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados).
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.



RESUMEN

Garantizar la seguridad alimentaria es un desafío global y los efectos del cambio climático afecta a la lucha contra el hambre. Se tiene como objetivo evaluar los efectos de cambio climático en el rendimiento del cultivo de la papa en el distrito de Azángaro, para el periodo 2023 – 2050 en condiciones normales. En el proceso se utilizan datos proyectados para dos rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 con tres modelos climáticos de circulación general CANESM2, HADGEM2-ES y MIROC5 con una corrección de sesgos en base a la data histórica de la estación Azángaro – SENAMHI; luego, se evaluaron los parámetros agrometeorológicos de clima, suelo, riego y evapotranspiración, para la producción de papa en dos condiciones de riego, lámina óptima y lámina reducida (riego por seco) y con los resultados de rendimiento y biomasa obtenidas se calibro el modelo AquaCrop 6.1, previa comparación con los datos de rendimiento registrados por la Dirección Regional Agraria Azángaro, finalmente se realizó las simulaciones con datos proyectados de precipitación y temperaturas máximas y mínimas. Los resultados de los 6 posibles escenarios son diferentes entre sí; sin embargo, revela promedios con tendencia a incremento de temperaturas máximas de 4.09%, el promedio histórico de temperatura mínima de 1.30 °C a 2.55 °C. Finalmente, se concluye que en el periodo 2023 al 2037 el rendimiento de cultivo de papa se podría mantenerse relativamente estables; sin embargo, descenderán ligeramente en el periodo 2038 hasta el 2050.

Palabras clave: AquaCrop, cambio climático, papa, rendimiento.



ABSTRACT

The fight against hunger is a global challenge and the effects of climate change can affect food security. The objective of this research is based on specifying how much the potato crop yields will be under the effects of climate change in the district of Azángaro - Puno, for the period 2023 - 2050, in the process projected data of two production routes are used. concentration RCP 4.5 and RCP 8.5 for three climate models of general circulation CANESM2, HADGEM2-ES and MIROC 5 with bias correction based on data from the Azángaro Station provided by SENAMHI, then, the agrometeorological parameters of climate, soil, irrigation are evaluated and evapotranspiration, for the production of the potato crop under two irrigation conditions, optimal layer and reduced layer (dry irrigation) and with the yield and biomass results obtained, the AquaCrop 6.1 model is calibrated, after comparison with the yield data registered by the Azángaro Regional Agrarian Directorate, finally the simulations are carried out with projected data of Precipitation and maximum and minimum temperatures imas for normal conditions of solar radiation, wind speed and relative humidity. The results of the 6 possible scenarios are different from each other, however it reveals averages suggesting increases in maximum temperatures of 4.09%, the historical average of minimum temperature increases from 1.30 °C to a projected average of 2.55 °C, consequently the values Evapotranspiration averages will increase by 3.18% and as a result it is concluded that potato crop yields for six possible scenarios projected from 2023 to 2050 and for normal Azángaro conditions, will remain relatively stable from 2023 to 2037, however they will decrease from 2038 to 2050.

Key Words: AquaCrop, Climate change, Potato, Yield.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El efecto del cambio climático es un asunto muy importante en la agenda medio ambiental internacional, en el que vienen afectando las diversas áreas, como la economía, comercio y acciones políticas a nivel mundial. Las zonas andinas son las más afectadas a consecuencia del cambio climático (Sanabria, J.& Marengo, J. & Valverde, M., 2009).

De acuerdo a las tendencias del clima en la sierra del Perú, la precipitación total anual y estacional comprende particularidades regionales, y los factores de la zona supeditan las conductas diferenciadas considerando o no la dependencia de la presencia intermitente de El Niño o La Niña (SENAMHI 2009a).

Analizando las incidencias excesivas de precipitaciones, en la sierra central ofrece tendencias a la reducción de precipitaciones pluviales extremas, en la sierra norte incrementan los días de la precipitación extrema. En la sierra sur se aprecia la reducción de días fríos e incremento de los días cálidos, este último en toda la sierra del Perú, notándose un patrón de calentamiento de las zonas altas y en menor cuantía a las partes medias y bajas de la vertiente occidental (SENAMHI 2009b).

La provincia de Azángaro se encuentra entre los primeros productores de papa a nivel regional, la región Puno el primer productor de papa a nivel del país, por lo que es necesario, importante y de gran interés realizar el presente experimento en las condiciones del distrito de Azángaro (Dirección Regional Agraria Puno, 2020).

El uso del software AquaCrop “Crop-model to simulate yield response to wáter”, de la FAO, “nos permite optimizar el rendimiento del cultivo y es



particularmente adecuado para hacer frente a las condiciones donde el agua y temperatura son factores claves de la producción” (FAO, 2020).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pabón (2011) en su trabajo define que:

“la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones alrededor de una condición predominante (normal climática), observadas durante periodos de tiempo relativamente cortos. Ésta incluye los extremos y las diferencias de los valores mensuales, estacionales y anuales con respecto a los valores promedio (generalmente de series de 30 años de extensión) de la correspondiente variable (por ejemplo, temperatura del aire, precipitación). La variabilidad climática incluye las variaciones intraestacionales (variaciones de dos o tres meses), interanuales (de año en año) e interdecadales (a través de decenios)” (p. 27).

Existe la preocupación de que el clima pueda estar cambiando más rápido que sus fluctuaciones naturales. Según el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, 1996), “las emisiones de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera continúan creciendo al ritmo actual, desencadenarán el cambio climático global en las próximas décadas, lo que se verá reflejado en diferentes fenómenos, estos alterarán específicamente los patrones de temperatura y precipitación pluvial de nuestro planeta” (p. 27).

“En el último siglo la población mundial se ha cuadruplicado, el consumo humano de agua se ha multiplicado por nueve y el consumo para usos industriales se ha multiplicado por cuarenta. La disminución de las reservas de agua se agrava con el aumento de la población mundial estimada alrededor de un 40% sobre la actual” (Montaño, 2002).



“La creciente demanda de agua dulce hace necesaria una mayor eficiencia en el uso de agua, es decir: producir el mismo volumen de bienes y servicios con menos agua” (Hoekstra, 2011).

“Entre el 2071 – 2100, el modelo HadRM3 proyectó la precipitación, simulando en un escenario extremo A2 con incrementos de hasta 2 mm/día principalmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en un escenario moderado B2 que son similares al patrón actual. Y la media de los modelos HadRM3 y el ETA CSS fueron los que proyectaron la temperatura, en los escenarios A2 y B2 presentando incrementos entre 2 °C a 4 °C, y al norte de lago incrementos de hasta 6 °C. Por otro lado, esta información obtenida es una primera aproximación del cambio climático futuro en el Altiplano Peruano, que puede ser utilizada para estudios de impacto de cambio climático en la agricultura, hidrología, etc. También está la perspectiva de entender mejor la variabilidad climática actual del Altiplano y proyectarlo hacia el futuro” (Sanabria., Marengo & Valverde, 2009).

La situación es aún más grave si se considera la contaminación de los ríos y lagos mundiales, aunque la escasez se deba a ciclos climatológicos extremos, la intervención de la mano del hombre influye en la escases, pues los niveles del recurso hídrico son bajos en cantidad y calidad, que satisfaga la necesidad humana medioambiental. “Durante los últimos 30 años la superficie de glaciares andinos disminuyó 22%, lo que ha generado una pérdida de más de 12 000 millones de metros cúbicos de agua. La desglaciación no solamente tiene un impacto en la disponibilidad de agua, sino que aumenta el riesgo de aludes y aluviones al incrementarse el número de lagunas colgantes” (Montaño, 2002).



La presente investigación nos permite ampliar los conocimientos de los comportamientos entre la variación de escenarios climáticos y cultivos haciendo uso de un software que ha sido desarrollado, nos permitirá calcular la productividad de los cultivos regados, simulando la respuesta de producción en función al volumen de agua aplicada en el cultivo, donde el agua es el factor determinante.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de la papa, en el periodo 2023 -2050, mediante el modelo AquaCrop, para condiciones normales del distrito de Azángaro – Puno?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo es el desempeño del modelo agrometeorológico AquaCrop para estimar los rendimientos del cultivo de la papa en el distrito de Azángaro – Puno?

¿Cómo repercutirá las varias futuras de temperaturas máximas y mínimas, y precipitación en los futuros rendimientos de cultivo de papa en escenarios de cambio climático para el periodo 2023 – 2050 en el distrito de Azángaro?

1.3. ANTECEDENTES

1.3.1. Antecedentes internacionales

Cortés y Alarcón (2017), en su investigación “Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca - Colombia”, desarrollo con el objetivo identificar la variación en la producción de los principales cultivos en escenarios de cambio climático para garantizar la seguridad alimentaria, logró como resultados la incorporación de acciones de adaptación idónea en las municipalidades más afectadas, con la interpolación de información por cultivos conforme a sus



parámetros idóneos de temperaturas y precipitación pluvial, mediante la modelación de las variables por área y labores de cultivo actual, proyectado para el periodo 2011 al 2040 y 2070 al 2100, contemplando condiciones de cambio de clima A2 (peores situaciones) y B2 (condiciones óptimas); obtenido bajo los escenarios de cambio climático A2 escenario pésimo y B2 escenario óptimo, en panoramas de emisiones de CO₂, los cuales fueron incorporadas en el modelo climático para obtener las proyecciones de clima, en donde se tiene que con los cambios climáticos, los cultivos de papa y arveja desaparecen, pero las áreas de cultivo de arroz incrementaría, en cuanto los panoramas A2 (2011 – 2040) y B2 (2011 – 2040), y se proyecta la reducción del 74% del área cultivada en los nueve cultivos evaluados, siendo en contraste en los escenarios A2 (2070 – 2100) y B2 (2070 – 2100), en donde se incrementa en un 5% el área óptima en relación al área actual. Estudio aporta en conocimientos de los comportamientos de la variación de escenarios climáticos y cultivos, con el uso de un software desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO, el mismo que es un modelo que nos permitirá calcular la productividad de los cultivos bajo riego, con la simulación de respuesta a la cosecha respecto al módulo de riego, siendo el factor limitante el agua de riego.

De acuerdo a Ochoa (2020), en su estudio “Calibración, validación y utilización del modelo AquaCrop para el cultivo de la Chufa (*Cyperus esculentus L. var. sativus Boeck*) en Valencia”, con el objetivo desarrollar una herramienta para la toma de decisiones respecto al manejo de riego en el cultivo, siendo la metodología la comparación a la respuesta de producción y el eficiente uso del recurso hídrico para el cultivo de la chufa, por medio de simulaciones en el software AquaCrop, Se realizó la calibración y validación del modelo AquaCrop con información para este cultivo mediante datos de humedad de suelo y condiciones agronómicas del cultivo en la zona



de estudio. El modelo aporta en la gestión del agua de riego por gravedad y riego localizado. Llegando a la conclusión de que el agua es necesaria en zonas áridas y semi-áridas, como en Valencia, sacando recomendaciones de manejo y tipo de riego, para optimizar los módulos de riego”.

De acuerdo a Flores, et al. (2012), en la “Simulación del rendimiento de maíz en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop”, con el objetivo de calibrar y validar el modelo para estimular el desarrollo del cultivo del maíz en el norte de la región Sinaloa de país de México, siguiendo la metodología en desarrollo en tres condiciones de riego: riego total (RT) y dos variantes de riego deficiente del 80 % y 60 % de RT. Consecuentemente el comparativo de parámetros observados y simulados respecto a la cobertura dosel vegetal, la cosecha de producción vegetal y el rendimiento de grano, desarrollado en parcelas de maíz (experimentales), establecidas en épocas de otoño - invierno de los años 2003 - 2004, 2007 - 2008 y 2008 - 2009, y temporadas de primavera - verano de 2008 y 2009. Obteniendo pronósticos buenos del modelo de rendimiento de grano con un valor de 0.79 toneladas por hectárea, para el error cuadrático medio (RMSE) y un índice de Willmott (d) de 0.85. Llegando a las conclusiones de que el modelo AquaCrop, es una opción de respuesta en el cultivo de maíz con dos variantes como son el riego deficitario y condiciones climáticas contrastantes.

Cortés (2013) en su investigación titulada: “El uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta”, con el objetivo de estimar la producción del cultivo de maíz en las regiones de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca”. En el que arribó a las conclusiones de que el software AquaCrop es una herramienta aplicable en la elección de fechas idóneas de



siembra y para optar por decisiones de medidas de adaptación a los fenómenos de cambios climáticos y antropogénicos (precios, demanda, oferta). Del mismo modo es útil para desarrollar sistemas de riego eficientes, propuestas de diseño de políticas públicas en el uso y manejo eficiente del agua de riego en Colombia, así como zonificar por climas requeridos en el agro en los cultivos estudiados y optar por medidas de adaptación con el fin de elevar la productividad del cultivo y consecuentemente tornando más productiva el uso del agua. Se concluye que, en el proceso de calibración y validación del modelo AquaCrop se requiere estimaciones en campo de los parámetros del cultivo, tales como el porcentaje de cobertura dosel, la biomasa en seco, rendimiento en seco, índice de cosecha, índice de fertilidad del suelo (%) reconocido por la planta, ensayos ejecutados bajo condiciones óptimas de manejo agronómico, y control de agentes externos como plagas y enfermedades. Los niveles de fertilidad de los suelos y el índice de cosecha potencial (HIo), son parámetros muy sensibles y concluyentes para obtener un buen modelo.

1.3.2. Antecedentes nacionales

El trabajo de Sanabria, Marengo y Valverde (2009), sobre “escenarios de cambio climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno)”, tuvo el objetivo de realizar evaluaciones y encontrar una aproximación de cambios futuros posibles en precipitaciones y temperaturas. Evaluó la proyección de cambio climático del período 2071 – 2100 en la región altiplánica del Perú, con tres modelos climáticos regionales (ETA CCS, HadRM3 y REgCM3), monitoreando las variables de precipitación y temperatura. Los resultados muestran que, el modelo HadRM3 obtuvo mejor comportamiento en simulaciones de parámetros de precipitación, tales como buena estacionalidad y mejor ciclo anual de precipitaciones,



con reducidos rangos de error frente a los otros dos modelos (ETA CSS y REgCM3), subestimando la precipitación media mensual en 2 mm/día. Para las simulaciones de temperaturas de los modelos ETA CSS y HadRM3, el primero mejor que el segundo, contemplando errores de temperatura media mensual de 4 °C y 5 °C, respectivamente. Para los modelos HadRM3 y ETA CSS que fueron los más certeros, sirven como referencia en los posibles cambios climáticos futuros. En el período futuro 2071 – 2100, la precipitación proyectada con el modelo HadRM3 en condiciones de altas concentraciones de CO₂, obtuvo aumentos de precipitación de hasta 2 mm/día en su mayoría en época de lluvias, y en condiciones de bajas concentraciones de CO₂ similares al patrón actual. Ahora, la temperatura proyectada simulada, en los modelos HadRM3 y el ETA CSS en los escenarios A2 y B2 se notaron aumentos de 2 °C a 4 °C, y al norte de lago se obtuvieron con incrementos de hasta 6 °C.

Belizario (2015), en su investigación “Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis”, tiene el objetivo evaluar los comportamientos de variables climáticas y el efecto en la actividad agrícola en la región de Puno, Perú. Desarrolló proyecciones respecto a temperaturas elevadas y precipitaciones pluviales para 46 años en 10 estaciones meteorológicas seleccionadas, dando como resultado que las temperaturas elevadas tienden a aumentar en 0.04 °C anualmente, las temperaturas medias tienden a un incremento leve anual de 0.025 °C, y las temperaturas mínimas con pocas variantes; pero las precipitaciones pluviales van reduciéndose, ocasionando impactos importantes en los cultivos. Finalmente concluye que las temperaturas mas elevadas tienden a un incremento anual promedio de 0.04 °C/año con evidencia leve (0.05), las temperaturas medias tienen incremento de 0.025 °C/año, con excepción de la estación Macusani reduce con evidencia leve(0.05). Las temperaturas mínimas tienen un aumento de 0.0004 °C/año, pero en las localidades de



Arapa y Progreso pronostican cambios negativos con 0.01 de nivel significancia. Las tendencias de precipitaciones son negativas de 0.70 mm/año en la cuenca Ramis, y no hay tendencia regional mayor. Las temperaturas y días de precipitación generan impactos significativas con 83.41 kg/ha de aumento en el cultivo papa, del mismo modo la precipitación pluvial total no tiene impacto significativo.

De acuerdo a Ordoñez (2016), el “Efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad Única bajo condiciones de La Molina”, tiene el objetivo de determinar los efectos que provocará el cambio climático sobre la evapotranspiración y el rendimiento de cultivo de la papa, sobre una proyección de seis posibles escenarios de futuros. Utiliza tres fases para su desarrollo, la primera fase está enfocado en el cultivo de papa (variedad Única) en áreas demostrativas y piloto de riego de la Universidad Agraria La Molina, para determinar las características de la papa a lo largo del ciclo vegetativo tales como riego, suelo, y labranza. En la segunda fase realizó la calibración y validación de los parámetros para el software AquaCrop, utilizando la data obtenida de estudios de campo a lo largo de la temporada de crecimiento. La tercera etapa incluye el procesamiento de datos de lluvia, Tmax y Tmin para seis posibles escenarios futuros de cambio climático. De acuerdo a la información obtenida, se predijo la evapotranspiración mediante la ecuación de Hargreaves calibrada para las condiciones del centro experimental y rendimiento mediante un modelo AquaCrop, finalmente se compararon las predicciones con registros históricos. En cuanto a la evapotranspiración se determinó que esta variable varió levemente entre enero y mayo, en cambio se incrementó hasta en un 50.74% entre mayo y diciembre; estos aumentos llevaron a obtener valores promedio anuales que oscilaron entre 1276.2 y cambios de 1394.7 mm dentro del rango. Con respecto al rendimiento, se encontró que la



precipitación modula los déficits hídricos resultantes del aumento de la evapotranspiración en años en los que también se encontró que los cultivos tenían estrés hídrico, lo que se traducía en rendimientos más bajos. Debido a ello optó en aumentar la lámina de riego a 500 m³/ha, con ello logra disminuir el déficit de agua y a incrementar el rendimiento crítico. Finalmente concluye que, las condiciones del campo experimental para producir papa en su variedad única frente a seis posibles escenarios futuros de cambio climático “no serán muy adversas”; sin embargo, se tendrá que modificar necesariamente la lámina de riego para los años más extremos.

Conforme a Calderón (2017), la papa peruana en Sudamérica y el Mundo, se valora y da importancia económica del cultivo en estudio; asimismo, sostiene que, “el Perú se posicionó como el principal productor de papa en América Latina”. El departamento de Puno, de acuerdo a los indicadores, el Perú es el primero en toda Latinoamérica, y en el mundo tenemos el puesto número once.

INEI (2015), en la publicación anual menciona: “Que Puno es el departamento con mayor superficie de producción nacional, con un área en hectáreas de 58,937, seguido de Huánuco con 40,793, Cusco con 30,667, Cajamarca 28,935, Junín con 24,480 y la Libertad con 24,007”. En la región Puno las condiciones climatológicas son variables, teniendo algunas provincias dificultades en la producción de cultivos, como principal factor es el descenso de temperaturas entre los meses de junio y julio, llegando a descender a menos de 0°C. El otro factor es la escasez de precipitaciones en los meses de lluvias que son de octubre a mayo.

Respecto al modelo agrometeorológico la FAO (2017) define: “AquaCrop es un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos desarrollado por la FAO para mejorar la productividad del agua en condiciones de secano y regadío. Simula la



respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua y es particularmente adecuado para las condiciones en las que el agua es un factor limitante en la producción de cultivos. Este modelo AquaCrop fue desarrollado en 2009 y desde entonces ha sido regularmente actualizado con nuevas versiones y utilizado en todo el mundo en diferentes condiciones agroecológicas”.

Cosio (2010), hace referencia: “La papa crece desde África hasta Rusia y eso muestra la adaptabilidad climática que tienen sus distintas variedades; por lo tanto, si el clima cambiaría drásticamente seguirá habiendo papa, solo que probablemente serán otras variedades”. Incide que es preocupante en las zonas más afectadas por el cambio climático en las que perjudica directamente a las regiones adaptadas a temperaturas extremas, con mayor altitud sobre el nivel del mar.

Según Pabón (2011), “la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones alrededor de una condición predominante (normal climática) observadas durante periodos de tiempo relativamente cortos”. Un cambio que combina extremos y diferencias en valores mensuales, estacionales y anuales con la media de las variables correspondientes (generalmente una serie de 30 años), como la temperatura y la precipitación. La variabilidad climática incluye intraestacional (cambios de dos o tres meses), interanual (anual) e interdecadal (décadas). Actualmente, está preocupado por los pasos acelerados del cambio climático relacionado con los cambios naturales.

De acuerdo al Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2014), aportan en que el aumento de niveles de dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera, de forma creciente a los ritmos actuales de emisión, producirán en las próximas décadas un cambio climático en toda la tierra, reflejados en diversos



fenómenos que alterarán principalmente en la temperatura y los comportamientos de las precipitaciones del mundo.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El cambio las variables climáticas como temperaturas, precipitaciones y entre otras, traen como consecuencia fuertes cambios las actividades del hombre, afectando directamente a la seguridad alimentaria, por la disminución en los rendimientos de los cultivos en estos últimos años, por lo que es importancia de realizar investigaciones sobre rendimientos agrícolas futuros de cualquier cultivo, genera conocimiento especializado en las áreas de recursos de agua y suelo, ya que desarrollará un círculo virtuoso, el cual sirve para alcanzar una perspectiva global e interdisciplinar sobre las ciencias agrícolas, a su vez, es uno de los pasos básicos para obtener conocimiento.

En la era actual de impactos del cambio climático y de avances tecnológicos y científicos más acelerados, es necesario estar preparados para el cambio y las novedades para incentivar el proceso producción agrícola, con las actividades de investigar, comprender y entender cómo producir cambios o dar soluciones tomando adecuadamente las decisiones en cuanto a la seguridad alimentaria principalmente, es por ello que en estos cambios de temperaturas todos deben sentir la importancia y necesidad de realizar investigaciones para lograr resultados satisfactorios.

1.5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

1.5.1. Hipótesis general

El efecto del cambio climático afecta negativamente al rendimiento del cultivo de la papa según el modelo AquaCrop en el periodo 2023 – 2050 para condiciones normales del distrito de Azángaro – Puno.



1.5.2. Hipótesis específicas

El modelo agrometeorológico AquaCrop tiene un desempeño idóneo para estimar los rendimientos del cultivo de la papa en el distrito de Azángaro – Puno.

La variación de valores futuros de Tmax, Tmín y Precipitación repercutirán negativamente al rendimiento del cultivo de la papa en el periodo 2023 – 2050, para condiciones normales del distrito de Azángaro – Puno.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de la papa, utilizando el modelo AquaCrop en el periodo 2023 - 2050 para condiciones normales del distrito de Azángaro – Puno.

1.6.2. Objetivos específicos

Evaluar el desempeño del modelo agrometeorológico AquaCrop en el cultivo de la papa mediante datos de parámetros observados en el distrito de Azángaro – Puno.

Evaluar futuros rendimientos de cultivo de papa en escenarios de cambio climático para el periodo 2023 – 2050 para el distrito de Azángaro.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se cita en el artículo 1, conceptualiza el cambio climático como "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables", por lo que la CMNUCC pronuncia la diferencia entre el cambio climático producido por las actividades humanas que cambia la composición de la atmósfera y la variabilidad climática producidas por causas naturales (IPCC, 2014).

2.1.1.1. Variabilidad climática

La variabilidad climática se define como las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo de al menos 30 años. “Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal. La Normal Climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como Anomalía” (Pabón, 2011).

2.1.1.2. Cambio climático

Son “las proyecciones de los cambios en el sistema climático elaborados empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van desde modelos sencillos a otros integrales. Estos son simuladores del sistema climático (atmósfera,



hidrósfera, criósfera, biósfera y litósfera) mediante la resolución de las ecuaciones aplicando leyes y principios de la física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema y los intercambios de energía y masa entre sí” (SENAMHI, 2015).

Los modelos desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), publicadas en una serie de documentos técnicos, informes temáticos y evaluaciones del conocimiento científico y técnico sobre el cambio climático para proporcionar a la comunidad internacional, “el Quito Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo I (AR5, de sus siglas en inglés), dedicado a las bases científicas físicas del cambio climático, confirma y refuerza, los resultados del anterior informe (AR4). El informe se basa en nuevas evidencias extraídas de un mayor número de observaciones, modelos climáticos mejorados, una mejor comprensión de los procesos y retroalimentaciones del sistema climático, y un mayor número de proyecciones de cambio climático. Este avance ha permitido que los cálculos relacionados se adapten a las políticas medioambientales” (SENAMHI, 2015).

2.1.1.3. Escenarios para el cambio climático

“Es una representación plausible que indica cómo posiblemente se comportará el clima en una región en una cierta cantidad de años, tomando en cuenta datos históricos y usando modelos matemáticos de proyección, generalmente para precipitación y temperatura” (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007).

Según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC, cada RCP “tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes sectorizadas, de emisiones y concentraciones de GEI y de usos de suelo

hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono. De acuerdo a la Figura 1, se visualiza los cuatro escenarios que comprenden las RCP, uno donde los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5)” (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2013) (p. 13).

Tabla 1. Características de los escenarios de emisión de dióxido de carbono para las rutas 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m² de forzante radiativa al 2100.

RCP	Forzante Radiativa (FR)	Tendencia de la FR	[CO ₂] al 2100	Rango probable para el cambio de T° superficial media (°C)	
				2046 - 2065	2081 - 2100
RCP 2.6	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm	0.4 – 1.6	0.3 -1.87
RCP 4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm	0.9 - 2.0	1.1 – 2.6
RCP 6.0	6,0 W/m ²	Creciente	670 ppm	0.8 – 1.8	1.4 – 3.1
RCP 8.5	8.5 W/m ²	Creciente	936 ppm	1.4 – 2.6	2.6 – 4.8

Fuente: IPCC (2013). Tomado de la guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. “Cambio Climático: Bases Físicas”.

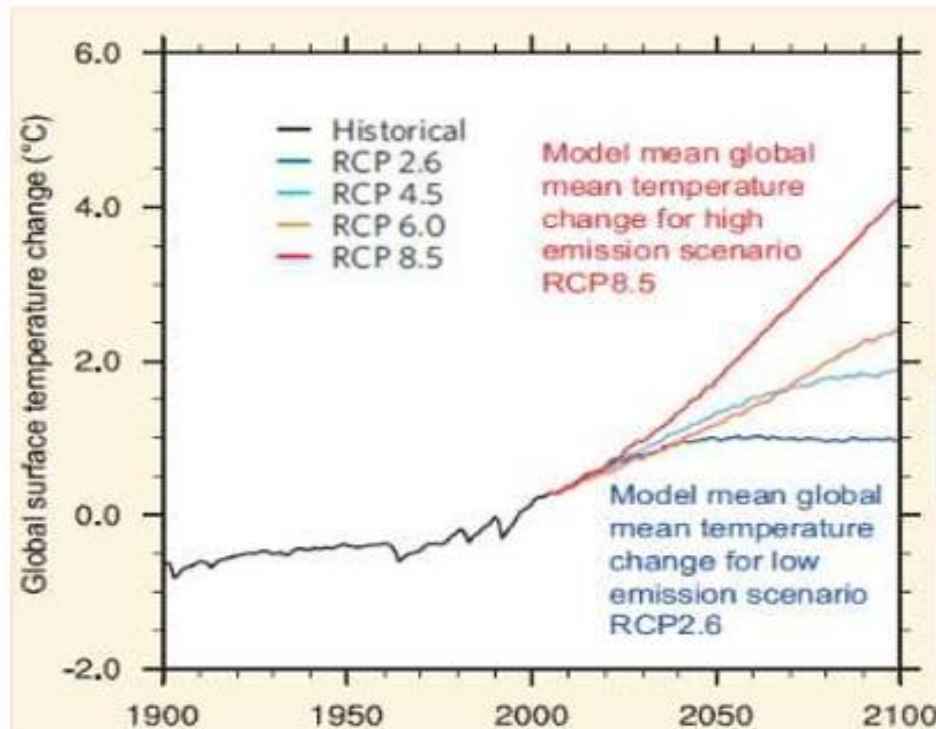


Figura 1. Cambio de la temperatura media mundial medio del modelo para el escenario de altas emisiones

Fuente: IPCC (2013), guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. “Cambio Climático: Bases Físicas”.

En la Figura 2 (sección superior), se muestra las regiones que presentarán períodos relacionados con extremos de temperaturas elevadas y menos episodios relacionados con temperaturas bajas extremos, produciendo calentamiento de tierras con mayor rapidez que las aguas del océano. La región ártica tiende a calentarse con mayor rapidez que las zonas tropicales. Visualizando en la figura de los gráficos inferiores, muestra la diferencia de la precipitación media entre las regiones húmedas y secas, presentando incrementos en mayores zonas del planeta. Las regiones ubicadas en el océano Pacífico Ecuatorial y en las latitudes altas generaran incrementos en sus precipitaciones.

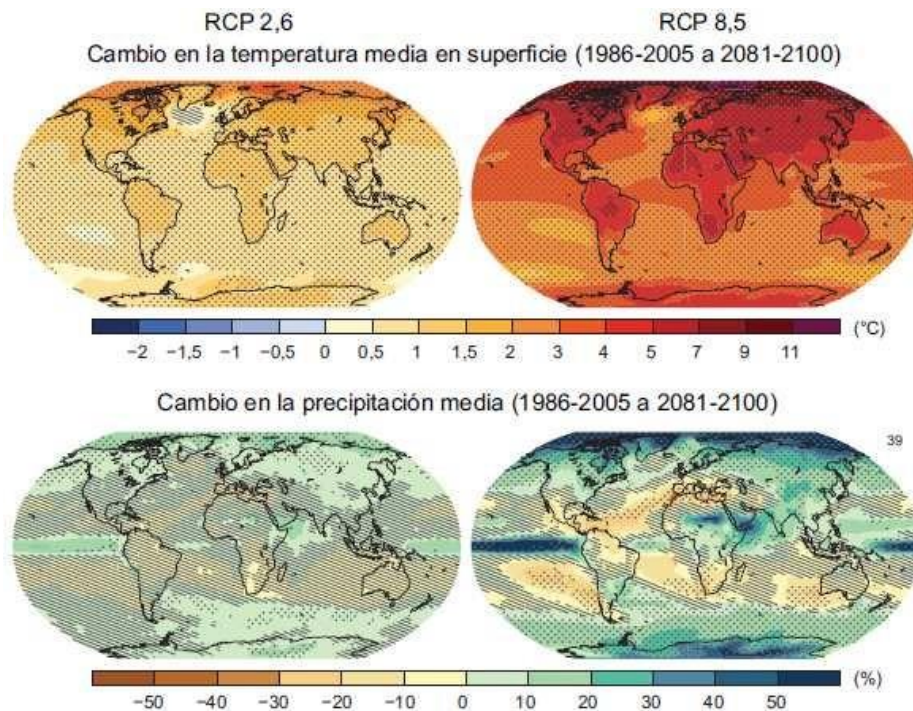


Figura 2. Variación de las precipitaciones y temperaturas medias, para los periodos 1986 - 2005 y 2081 - 2100.

Fuente: IPCC (2013). Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. “Cambio Climático: Bases Físicas”.

Por lo tanto, la mayor incidencia de radiaciones radiactivas en las próximas décadas requiere de modelamientos de los posibles efectos a nivel hidrológico y por lo tanto la reducción de la disponibilidad de recursos hídricos a nivel global, herramientas necesarias para su gestión y explotación en el mediano y largo plazo.

2.1.1.4. Modelos de circulación general (GCM)

Son simulaciones climáticas altamente detalladas en función a grillas que utiliza la física atmosférica para predecir la hora, el día y años en el futuro. Estos modelos (Figura 3) se usan comúnmente para predecir el cambio climático a lo largo de años, décadas y siglos. GCM se está volviendo cada vez más preciso a medida que se comprende mejor la física de la atmósfera. A medida que las computadoras se volvieron más capaces de computar, los modelos se volvieron más accesibles para el público en general.

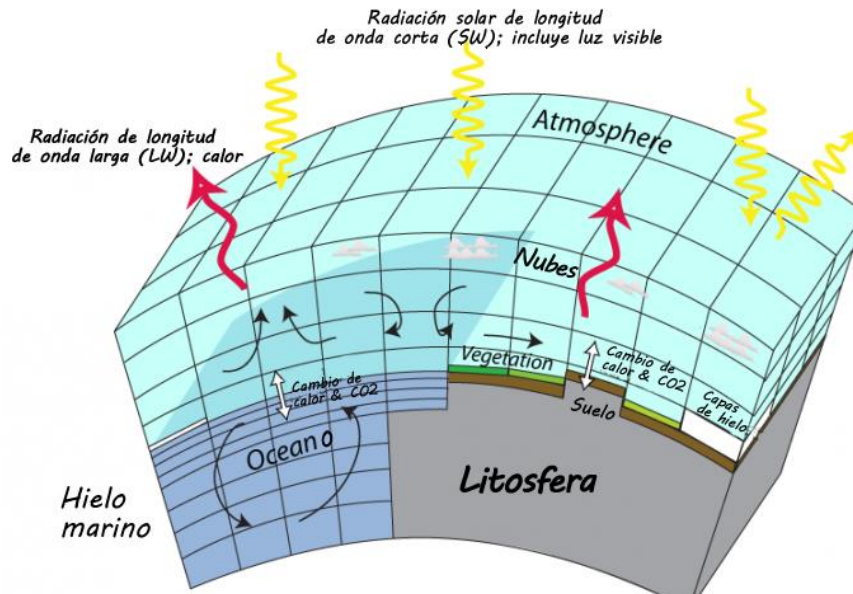


Figura 3. Estructura esquemática de un GCM.

Fuente: David Bice © Penn State University (2007).

Según el IPCC (2007), “los modelos de circulación general (GCM, de sus siglas en inglés) es una simplificación e idealización del sistema climático, por lo que es considerada como una herramienta de alto avance disponible en la simulación de la respuesta global a las cada vez mayores concentraciones de gases de efecto invernadero”.

Como resultados, estos modelos incluyen series temporales de variables climáticas como la temperatura y la precipitación. Para ello, los modelos de circulación general representan procesos físicos en la atmósfera, la criosfera y la superficie de la Tierra. Usando una cuadrícula 3D global, con una resolución horizontal típica de 250-600 km y 10-20 capas verticales en la atmósfera, esto sube a 30 capas en el océano (Figura 4). Por lo tanto, la red es muy gruesa, es imposible diseñar procesos que ocurran en una escala más baja (como procesos hidrológicos en cuencas).

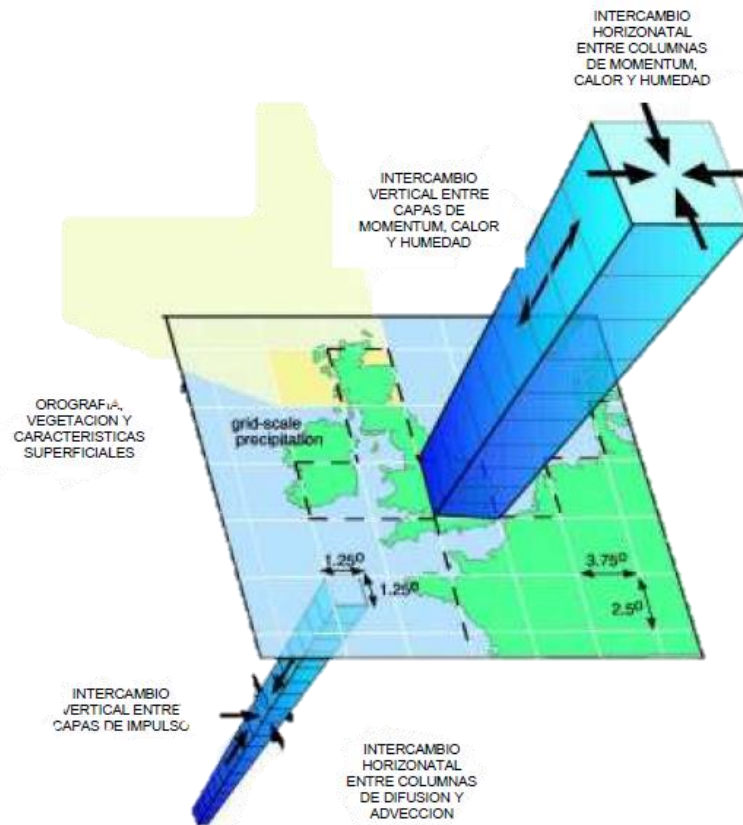


Figura 4. Perspectiva 2 del diseño esquemático de los GCM

Fuente: (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007).

Los Modelos Climáticos de Circulación General (GCM), de acuerdo a lo que indica Amador y Alfaro (2009), “muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones a escala global. Esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala estadística y dinámica”.

“La regionalización estadística asume una relación entre las variables a una gran escala espacial y el clima local, como precipitación y temperatura. Se utiliza la ecuación de transferencia (por ejemplo, regresión lineal) para determinar esa relación.



Por otra parte, con respecto al segundo método, la regionalización dinámica usa la información de modelos globales, pero se ejecuta con una mayor resolución espacial en un proceso llamado anidación” (SENAMHI, 2015).

2.1.1.5. Los escenarios climáticos en Perú

Amador y Alfaro (2009), indica que “en contraste con la resolución grosera de los actuales GCMs (~200 km), casi todos los efectos del cambio climáticos ocurren a escala local (100 m – 1 km) y su modelación requiere resolución de meso escala. Este ajuste de escala es particularmente importante en regiones de topografía compleja: montañas, zonas costeras, lagos, etc. como es el caso del Perú” (p. 11).

“Las regionalizaciones climáticas son técnicas las cuales permiten derivar información a escala más fina desde las salidas de los GCM para estudios de impacto. Por lo tanto, considerando la experiencia desarrollada en la regionalización de escenarios de cambio climático en el Perú, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú” (SENAMHI, 2020), de acuerdo al marco conceptual del proyecto se ha usado de técnicas y métodos de reducción de escala “downscaling”, lo que permitió tener información adaptadas a parámetros y características específicas del país. En este sentido, para desarrollar la técnica anterior se requiere de una base de datos observacional que permita desarrollar y validar diferentes modelos estadísticos a nivel regional, en los cuales el SENAMHI brinde información diaria de las variables climáticas: precipitación, temperaturas máximas y mínimas, para todas las estaciones del Perú (Figura 5).

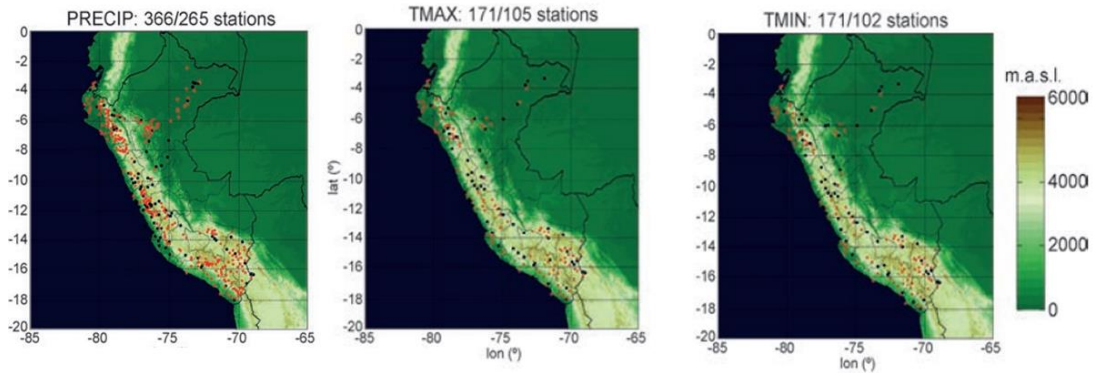


Figura 5. Estaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Fuente: (SENAMHI, 2015).

El SENAMHI pronosticó valores de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para el período 2015 - 2050 (media centrada del periodo 2036-2065), alcanzando un grupo de 6 escenarios posibles futuros (3 GCM X 2 RCPs). Para este acometido se empleó tres modelos de circulación general (CanESM, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos rutas (RCP 4.5 y 8.5).

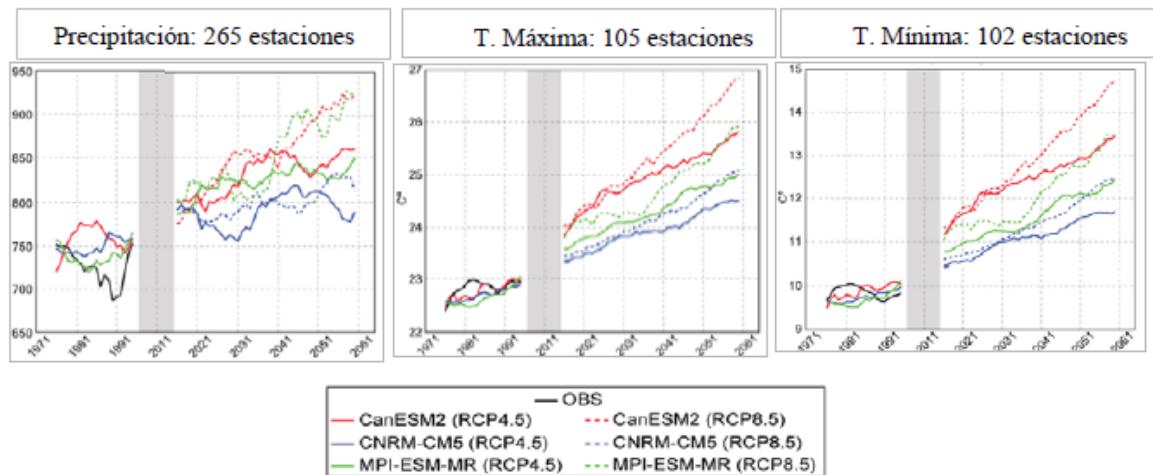


Figura 6. Proyecciones climáticas con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000.

Fuente: SENAMHI (2015).

2.1.1.5.1. Modelos climáticos regionales Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 y Eta-MIROC5

Las simulaciones climáticas que se usan en este trabajo se basarán en la reducción de escala dinámica de las simulaciones del modelo climático global (GCM) CanESM2, HadGEM2-ES y MIROC5 haciendo uso del modelo climático regional Eta (Chou et al., 2012; Marengo et al., 2012; Mesinger et al., 2012; Pesquero et al., 2010), los modelos fueron recomendados para evaluar las proyecciones de cambio climático en América del Sur (Dereczynski et al., 2020).

Las principales características de los GCM se resumen en la Tabla 2. Los escenarios de emisión radiativa elegidos fueron: RCP4.5 que es un escenario medio a bajo, suponiendo una estabilización del forzamiento radiativo a 4.5 W/m^2 para 2050; y RCP8.5 que es la situación más pesimista, con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 para 2050.

Tabla 2. Modelos climáticos globales (GCMs) HadGEM2, CanESM2 y MIROC5 utilizados para la reducción de escala estadística de escenarios climáticos.

Nombre de GCM	Resolución n	Referencia	Niveles en vertical
CanESM2 -ES- Canadian Earth System Model version 2	$2.75^\circ \times 2.8125^\circ$	Aurora et al. (2011)	35
HadGEM2 – Hadley Centre Global Environmental Model versión 2	$1.274^\circ \times 1.875^\circ$	Collins et al. (2011)	38
MIROC5 – Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5	150 km	Watanabe et al. (2010)	40

Fuente: Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde River Basin using two hydrological models (2021).

El método de reducción de escala (downscaling) proporciona simulaciones con resolución espacial de 20 km, cubriendo los siguientes períodos: 1961 a 2005 para la línea de base y 2011 a 2099 para los escenarios futuros (RCP4.5 y RCP8.5), sin embargo, están sujetas a sesgos sistemáticos, causado generalmente por errores de



conceptualización, discretización y promedio espacial de las variables climáticas dentro de una cuadrícula (Teutschbein y Seibert, 2012).

2.1.1.6. Cambios proyectados en el altiplano peruano.

Lujano et al. (2016), evaluaron los cambios en la disponibilidad del recurso hídrico bajo escenarios de emisiones de Modelos Climáticos Globales (MCG) del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5). “La distribución espacio-temporal de la precipitación, se tomó como referencia la climatología 1971 – 2000 y sus proyecciones para el horizonte 2071 – 2100. El Simulador del Sistema Terrestre y el Clima de la Comunidad Australiana versiones 1.0 y 1.3 (ACCESS1.0 y 1.3) y el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima versión 5 (MIROC5), simularon adecuadamente el ciclo estacional de la precipitación y en base a los resultados, los cambios de precipitaciones para los caminos de concentración representativas (RCP4.5 y 8.5) a finales del siglo XXI, indican un ligero incremento de la precipitación anual en la cuenca Ramis y una disminución para la cuenca Ilave” (p. 195). Finalmente concluyen que las disminuciones de las precipitaciones afectarán mayormente a la cuenca Ilave y con pequeños incrementos en el promedio anual en la cuenca Ramis.

Los resultados de la validación mostraron que los modelos HadRM3 y ETA CSS son más próximos a lo observado, los probables cambios climáticos a futuro fueron basados en los resultados de estos dos modelos. Por lo tanto, para el periodo 2071 – 2100, la lluvia proyectada con el modelo HadRM3, escenario con altas concentraciones de CO₂ (A2) arroja aumentos de precipitaciones pluviales de hasta 2 mm/día, esencialmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en el escenario con bajas concentraciones de CO₂ (B2) parecidos al patrón actual. Ahora, la temperatura que se

proyecta resultante promediada de los modelos HadRM3 y el ETA CSS simularon escenarios para A2 y B2 aumentos de 2 °C hasta 4 °C y mayores aumentos de hasta 6 °C al norte de lago (Sanabria, Marengo, & Valverde, 2009).

2.1.2. Coeficientes de un cultivo

Calcular la evapotranspiración de un cultivo se da por multiplicar, el K_c por el E_{To} , el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la superficie del pasto de referencia y la evapotranspiración de la superficie cultivada. Esta diferencia se puede combinar en un factor de cultivo único o integrado, o se puede separar en factores duales que describen por separado las diferencias en la evaporación y la transpiración entre las dos superficies: “La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos” (Allen, 2006).

Tabla 3. Criterios para seleccionar el coeficiente único y dual.

	Coeficiente único del cultivo K_C	Coeficiente dual del cultivo $K_{cb} + K_e$
Propósito del cálculo	<ul style="list-style-type: none">- Diseño y planificación del riego- Manejo del riego- Calendarios básicos de riego- Calendarios de riego en tiempo real para aplicaciones no frecuentes de agua (riego por superficie y aspersión)	<ul style="list-style-type: none">- Investigación- Calendarios de riego en tiempo real- Calendarios de riego en tiempo real para aplicaciones de agua con alta frecuencia (micro irrigación y riego por aspersión automatizado)- Riego suplementario- Estudios detallados de balance de agua en hidrología y suelos
Escala temporal	Diaria, 10 días, mensual (cálculos y datos)	Diaria (cálculos y datos)
Método de cálculo	Gráfico, calculadora de bolsillo, computadora	computadora

Fuente: Allen (2006).

2.2.2.1. Coeficiente único del cultivo (K_c)

“Bajo el enfoque del factor de cultivo dual, los efectos de la transpiración y la evaporación del suelo se determinan por separado. Se utilizan dos parámetros: el

coeficiente base del cultivo (K_{cb}) para describir la transpiración de la planta y el coeficiente de evaporación del agua del suelo (K_e), que describe la evaporación que se produce en la superficie del suelo”; el coeficiente único K_c es reemplazado por (FAO, Evapotranspiración del cultivo, 1990):

Ecuación 1. K_c

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Dónde:

- K_c , coeficiente único del cultivo; K_{cb} , coeficiente basal del cultivo; y K_e , coeficiente de la evaporación del agua del suelo.

El “coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , es definido como el cociente entre E_{Tc} y E_{To} , cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c , en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El coeficiente de evaporación en el suelo, K_e , describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e podrá exceder un valor máximo, K_c máximo, que es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo

del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo” (FAO, Evapotranspiración del cultivo, 1990).

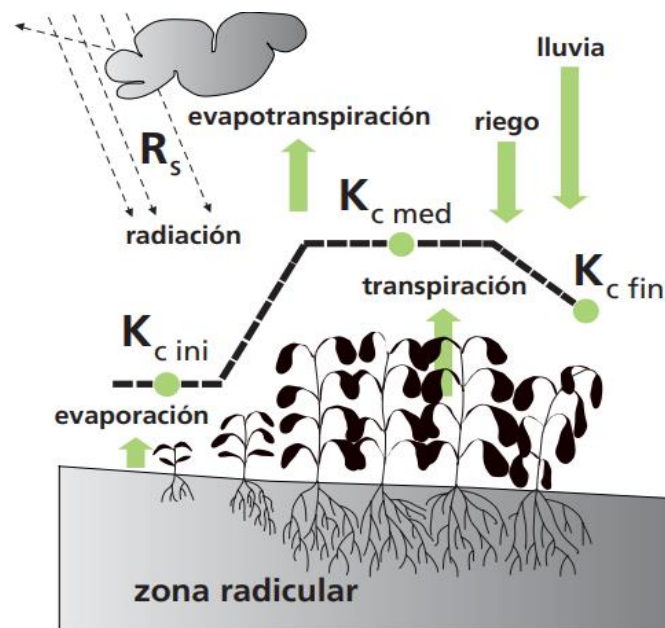


Figura 7. Evapotranspiración del cultivo (Ciclo del agua clásico).

Fuente: (FAO, 2006).

El procedimiento de factor de cultivo doble requiere más cálculos numéricos de promedio de tiempo de factor único (K_c): “El procedimiento de cálculo del coeficiente dual es preferible para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para los estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de ET_c , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda” (FAO, 1990).

La suma de los valores de K_{cb} y K_e representa el factor de integración del cultivo, K_c . La curva de K_c total, representada por una línea de puntos en la Figura 8, muestra el efecto del K_{cb} K_e promediado en el tiempo, representado por una curva

suave: “Es esta curva suavizada la que es elaborada al considerarse el procedimiento de cálculo del coeficiente único del cultivo K_c . La curva de K_c se sitúa por encima de la curva de K_{cb} , encontrándose potencialmente las mayores diferencias durante la etapa inicial y de desarrollo, dependiendo de la frecuencia del humedecimiento del suelo” (Allen, 2006).

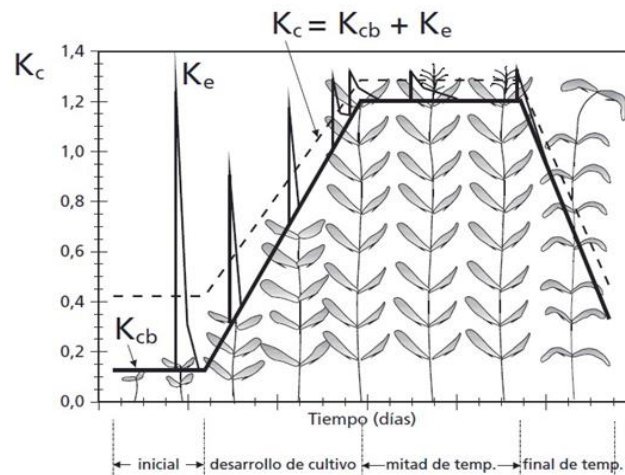


Figura 8. Curva del coeficiente dual del cultivo.

Fuente: Allen, et al. (2006).

2.1.3. Coeficiente de estrés hídrico de cultivo (K_s)

En un suelo humedecido, el agua tiene una energía potencial alta, con amplitud y libertad de movimiento, por lo tanto, ofrece facilidad de extracción por las raíces de las plantas: “En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, y es retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo” (Duarte, 2012).

“Cuando la energía potencial del agua en el suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que la planta está bajo estrés. Los efectos del estrés hídrico se resumen multiplicando el factor de rendimiento base por el factor de estrés hídrico K_s ” (Allen, 2006):



Ecuación 2. K_s

$$ET_c = (K_s * K_{cb} + K_e) * ET_o$$

En dónde:

ET_c: Evapotranspiración de cultivo mm/día;

ET_o: Evapotranspiración de referencia de cultivo mm/día;

K_{cb}: Coeficiente básico de cultivo,

K_s: Coeficiente de estrés hídrico,

K_e: Coeficiente de la evaporación del agua del suelo.

“Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, K_s < 1. Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo, K_s = 1” (Allen, 2006).

“Los efectos del estrés hídrico están directamente relacionados con la expansión del dosel, la conducción estomática y el envejecimiento prematuro de las hojas. El índice de estrés es la pérdida de humedad de la zona de raíces (Dr), y los umbrales son la pérdida de humedad del suelo de la zona de raíces expresada como parte (p) de la disponibilidad total de agua del suelo (TAW). En el punto en que ya no hay agotamiento, el K_s = 1.0. A medida que avanza el agotamiento, el K_s no disminuye de 1.0 hasta que alcanza el umbral superior para efecto del estrés: Este umbral se denomina pupper. Un incremento adicional del agotamiento en la zona radicular produce valores inferiores del K_s, hasta llegar al umbral inferior (denominado plower), donde el K_s se vuelve cero y el efecto por estrés es máximo” (Allen, 2006).

De acuerdo a Steduto et al. (2012), “un mayor agotamiento por debajo del punto tiene efectos adicionales y el K_s sigue siendo cero. En el caso de estrés hídrico,

la forma de la curva puede variar desde muy convexa, pasando por levemente convexa, hasta lineal. Desde el punto de vista conceptual, mientras más convexa sea la curva, mayor es la capacidad del cultivo para ajustarse y aclimatarse al estrés. Una relación lineal indica una aclimatación mínima o nula. Los umbrales de estrés, así como la forma de la curva, se establecen por calibración y deberían estar basados en el conocimiento de la resistencia o la tolerancia del cultivo a la sequía”.

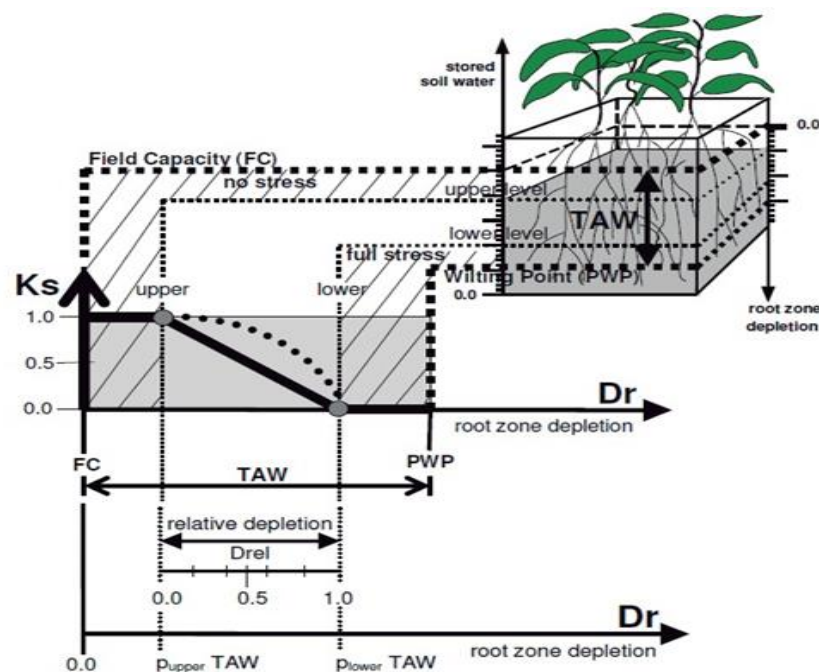


Figura 9. Estrés hídrico (K_s) para niveles de agotamiento en la zona de raíz (D_r).

Fuente: (FAO, 2006)

Así como menciona “de los tres primeros procesos afectados por el estrés hídrico, estudios desarrollados han mostrado que la expansión foliar (por ende, el dosel) es el más sensible, y la conductancia estomática es sustancialmente menos sensible. Dependiendo de la especie, la senescencia foliar (por ende, el dosel) puede ser igual o ligeramente menos sensible que la conductancia estomática. El ajuste de los tres umbrales superiores para el estrés hídrico de un cultivo debe ser consecuente con estas observaciones” (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012) (p. 87).

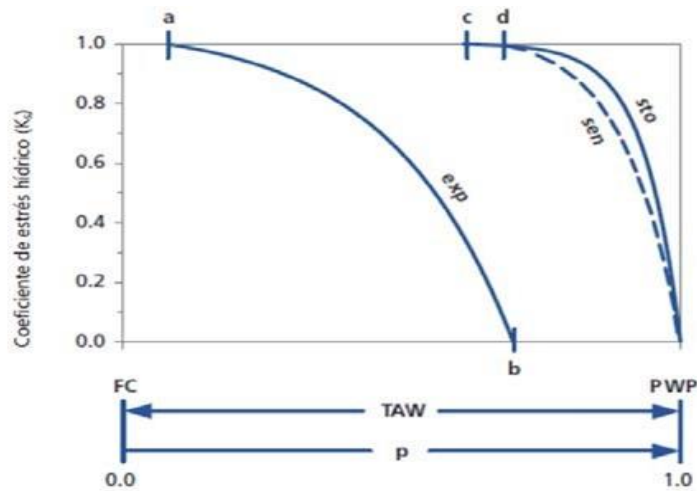


Figura 10. Diferencia en los coeficientes para cada proceso.

Fuente: Allen (2006).

“La curva de módulo de estrés (K_s) para la extensión del dosel (exp), la conductancia estomática (sto) y el envejecimiento del dosel (sen) del átomo en función del agotamiento de la raíz atmosférica (p). El límite superior de la escala está marcado con a y el límite inferior está marcado con el símbolo b: Los umbrales superiores para el cierre estomático y la senescencia del follaje están señalados con c y d, respectivamente” (Allen, 2006).

2.1.4. Relación de productividad del cultivo y estrés hídrico

Doorenbos y Kassam (1979) de la FAO, “suministra una función lineal sencilla para determinar la relación entre el uso del agua por el tipo de cultivo y la productividad, relación útil para predecir la reducción en la productividad del cultivo cuando el estrés hídrico es inducido por la falta del agua del suelo”:

Ecuación 3. Relación productividad/cultivo/stress hídrico

$$(1 - \frac{Y_a}{Y_m}) = K_y (1 - \frac{ET_{caj}}{ET_c})$$

En dónde:



Ky: Factor de respuesta de productividad de cultivo;

Ya: Rendimiento de cultivo real;

Ym: Rendimiento máximo;

ETc aj: Evapotranspiración ajustada (real) del cultivo mm/día;

ETc: Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar mm/día.

“El factor de respuesta de rendimiento (Ky) captura la naturaleza de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en los cultivos, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos: La relación ha demostrado una notable validez y ha brindado un procedimiento utilizable para cuantificar los efectos de los déficits de agua sobre el rendimiento” (FAO, 2018).

“La reducción de producción se debe al déficit de del recurso hídrico: Es relativamente pequeña durante los periodos de desarrollo vegetativo y de maduración, siendo mayor durante los periodos de floración y formación del fruto” (FAO, 2018).

2.1.5. Modelo AquaCrop

2.1.5.1. Descripción del modelo.

La FAO (2012) describe al modelo AquaCrop: “Como un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos para mejorar la productividad de agua, esencialmente dirigido a simular el desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable como resultado del agua disponible”. Plantea el sistema suelo – planta - clima como un entrelace consecutivo, simulando la respuesta de los cultivos en valores de rendimiento, y es empleado especialmente para representar condiciones donde el agua es un factor limitante de la producción. Se requieren los datos de entrada como de clima, los cultivos, el suelo, el riego y la gestión del riego.



Raes et al. (2009) indica que, “el modelo AquaCrop realizó un nuevo enfoque al problema de la producción de biomasa, considerando la separación de la evapotranspiración (ET) en la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr) y además consideró el rendimiento final (Y) dividido en la biomasa (B) y el índice de cosecha (IC). La separación de la ET en E y Tr evita el efecto de la confusión del uso consuntivo y no consuntivo del agua. Esto es un avance importante sobre todo durante los períodos en los cuales la cobertura del suelo es incompleta, pues el componente de transpiración es menor. La separación de Y en B e IC permite la distinción de la base funcional de las relaciones entre el medio ambiente y la biomasa (B) y el medio ambiente y la cosecha (IC). Estas relaciones son, en realidad, fundamentalmente diferentes y su uso evita la confusión de los efectos de estrés hídrico en la biomasa y la cosecha” (p. 56). Los cambios descritos se pueden representar en la ecuación 4.

Ecuación 4. Modelo AquaCrop

$$B = WP \sum Tr$$

En donde:

Tr: Transpiración del cultivo (mm) y

WP: Parámetro de productividad hídrica (kg biomasa/m² y por mm de agua transpirada sobre el período de tiempo en el cual la biomasa es producida).

Así mismo, AquaCrop utiliza parámetros y variables de entrada relativamente reducidos, pero claros e intuitivos, sin requerir métodos complejos para su determinación. El uso de este modelo AquaCrop incluye la evaluación de los recursos hídricos necesarios para lograr los rendimientos de los cultivos en una ubicación

geográfica determinada para respaldar las decisiones sobre la asignación de agua y otras acciones de política hídrica.

2.1.5.2. Características y cualidades del modelo AquaCrop

El núcleo del modelo AquaCrop está representado por la Figura 11. Aunque el proceso de radiación solar es el centro, no se considera directamente, sino dentro del rango de determinación de la ETo (evapotranspiración de referencia). Este es un procedimiento que debe ejecutarse fuera del modelo y utilizadas como variables de entrada. Sin embargo, el motor real de este modelo es la productividad hídrica (WP), que es la base para determinar el proceso que se muestra en la Figura 11, que se utiliza para determinar la producción de biomasa en función de la transpiración del cultivo.

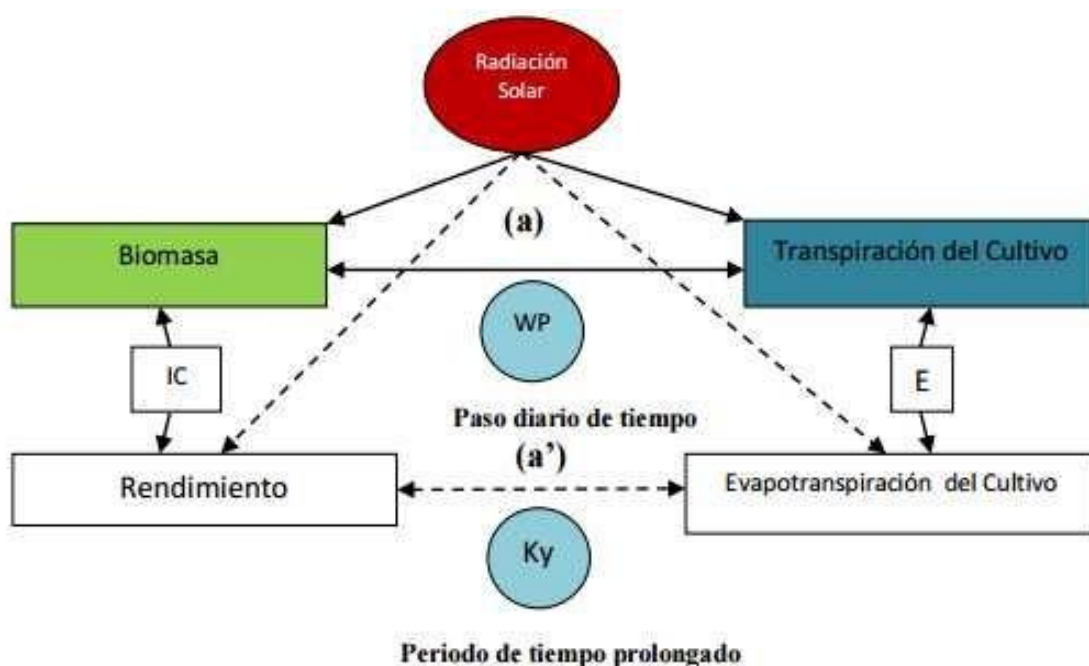


Figura 11. Esquema básico del modelo AquaCrop.

Fuente: (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).

Ordoñez Paz (2016), describe “toma el régimen de precipitación y el régimen termal dentro del modelo, la demanda evaporativa de la atmósfera incluyendo la

concentración de dióxido de carbono, adicionalmente el modelo considera algunos otros aspectos de manejo como la irrigación, las coberturas del suelo, prácticas de surcos y diques, y la fertilización en forma general” (p. 79). “El nuevo enfoque, hacia el concepto de la productividad hídrica normalizada WP^* permite la consideración de espacios de tiempo más reducidos que los antiguos planteamientos” (Doorenbos, J., & Kassam, A. H, 1979). Como se muestra en la Figura 12, se representa por la variable rendimiento constante del cultivo (K_y), donde el resultado se obtiene al final del ciclo del cultivo.

La Figura 12 muestra el diagrama de flujo del modelo AquaCrop con los componentes principales considerados. “El componente atmosférico considera el clima como el motor del proceso del flujo hídrico del sistema planta – suelo – atmósfera, este componente considera varios elementos que contribuyen en tres sentidos fundamentales:(1) Balance Hídrico. (2) El comportamiento Fenológico de la planta con sus restricciones térmicas y (3) La construcción de biomasa con base en dos aspectos principales el potencial evaporativo de la atmósfera representado por la evapotranspiración de referencia (E_{To}) y la disponibilidad de (CO_2) presente en la atmósfera, estos elementos van a ser los dos elementos tomados por el modelo para normalizar la productividad hídrica (WP). Dentro del sistema de crecimiento de la planta se tienen en cuenta los procesos de expansión de la hoja y por lo tanto del dosel hasta su máximo desarrollo, la obtención de la cosecha y el posterior proceso de senescencia, todo lo cual se determina por la secuencia de seguimiento de la cobertura del suelo por el dosel. Con base en estos procesos se evalúa en forma proporcional la evaporación del suelo, la transpiración del dosel, y la productividad hídrica normalizada (WP^*) que conlleva a la generación de la biomasa producida (B) y el índice de cosecha (IC), por lo tanto, el respectivo rendimiento. El dosel representa la

proporción de la transpiración real que consigue obtener biomasa a través de la productividad hídrica (WP)”. Por lo tanto, la cosecha, que está determinada por el rendimiento (Y), se calcula a partir de la relación de biomasa basada en el índice de cosecha a través de la ecuación 5 (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).

Ecuación 5. Rendimiento de la cosecha

$$Y = HI * B$$

En donde:

Y: Rendimiento,

B: Biomasa;

HI: Índice de cosecha.

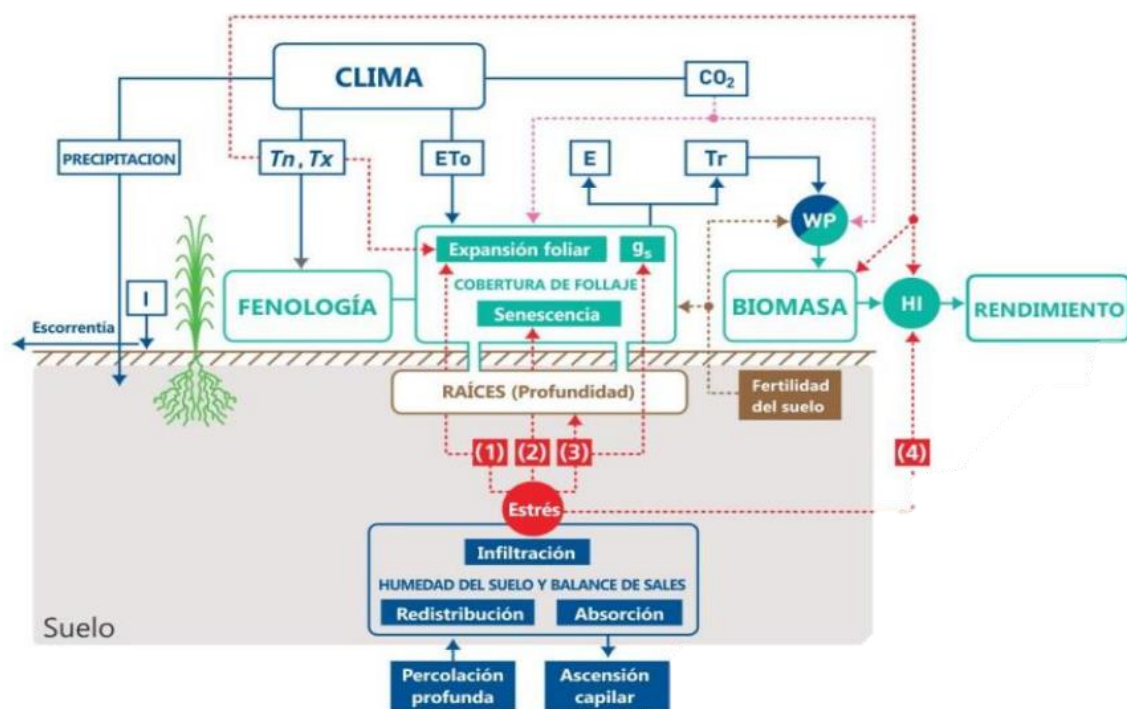


Figura 12. Diagrama de flujo del modelo agrometeorológico AquaCrop.

Fuente: (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009)

Aunque, “AquaCrop usa el IC para calcular el rendimiento, el modelo no calcula la partición de la biomasa en varios órganos (por ejemplo, hojas, raíces, etc.), sino que la producción de biomasa es articulada por medio de la expansión del dosel y dependiente de la raíz. Esto simplifica los procesos y evita la complejidad del

particionamiento, los cuales tienen actualmente alguna incertidumbre. En el sistema suelo que sirve como repositorio del balance hídrico, se observa anclado el sistema radical, no como un elemento estático sino como un ente vivo que crece a lo largo del ciclo del cultivo y que por lo tanto involucra capas de suelo con las respectivas características hidráulicas, en donde ocurren los procesos de escorrentía, infiltración, redistribución hídrica en las capas del suelo, drenaje, y percolación profunda” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009) (p. 117).

El “CO₂, presente en la atmósfera va a contribuir a la expansión de la hoja y a la productividad hídrica, su incremento en la atmósfera es considerado por AquaCrop con base en los reportes de los diferentes escenarios de cambio climático que son estimados a través de los años de acuerdo a los modelos de circulación global establecidos” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009) (p. 119).

Además, “existen tres funciones de respuesta al estrés hídrico sobre el desarrollo del dosel, la conductancia estomática y la senescencia temprana del dosel. Cada una de estas funciones son determinadas por los respectivos coeficientes de estrés hídrico (Ks), los Ks son modificados a partir del tipo de estrés que se presente y varían desde niveles sin estrés hasta totalmente estresados valores desde uno hasta cero respectivamente” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009) (p. 119).

2.1.5.3. Ventajas del modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop marca un cambio significativo en la determinación de la biomasa de cultivos herbáceos y la producción agrícola a través de aspectos básicos:

- Desde un punto de vista operativo, la ventaja del modelo radica en que los parámetros y variables de entrada del modelo son muy inferiores a los



requisitos de la mayoría de modelos de este tipo para la obtención de biomasa y la determinación de la masa de fabricación. Además, las variables requeridas son en su mayoría más simples y más fáciles de obtener.

- “Como ya se mencionó, cambia el antiguo manejo integrado de la evapotranspiración (ET) considerando por separado la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr), para obtener la verdadera incidencia que tiene el agua en la producción de biomasa y la incidencia de la evaporación en la superficie del suelo descubierto. La consideración por separados de estos dos componentes hídricos, permite no sólo la posibilidad de la determinación del uso productivo (Tr) y no productivo (E) del agua en la producción del cultivo, sino también la posibilidad de la evaluación de la cobertura vegetal y las áreas de la superficie del suelo libres con estimaciones a partir del uso de sensores remotos y medios fotográficos” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).
- “La separación de la producción del cultivo (Y) en sus componentes de biomasa (B) y el índice de cosecha (IC), esto permite la distinción y el manejo por parte del modelo de la influencia del medio ambiente en la biomasa y la cosecha independientemente” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).
- “Las respuestas del cultivo al déficit hídrico se simulan con cuatro modificadores o coeficientes que son funciones de la fracción de agua disponible en el suelo, esta fracción de agua disponible está modulada por la demanda de evaporación de la atmósfera, teniendo en cuenta las diferencias de sensibilidad al estrés hídrico de la planta de estos cuatro procesos: la expansión del Dosel, el control estomático de la transpiración, la senescencia de Dosel, y el Índice de Cosecha” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).



- “La posibilidad de poder determinar o estimar la cantidad de biomasa producida en cualquier momento del ciclo fenológico del cultivo y poder aplicar escalas de tiempo diferentes al ciclo total o a la temporada de producción completa, o para escalas de tiempo grandes se ha podido detallar con el modelo AquaCrop el cual puede usar medidas de tiempo a nivel del día, estimando la biomasa para periodos muy cortos” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).
- “Para determinar el crecimiento de la biomasa del suelo y tasa la transpiración real del cultivo; puesto que, la mayoría de los modelos actuales vienen realizándose convencionalmente con monitoreo de índice de área, análisis de hojas (LAI), este generalmente se pierde en su diseño. Sin embargo, AquaCrop ya no requiere esta escala, sino que se ha establecido el monitoreo de la vegetación, que es fácil de identificar mediante imágenes y podría integrarse en el futuro uso a gran escala de sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).
- “El modelo se centra en el agua porque es una fuerza impulsora clave para la producción agrícola, asimismo, debido al crecimiento continuo de la población, la industrialización y la mejora de los niveles de vida en todo el mundo, se nos exige tener un mayor uso de los recursos hídricos. El factor clave que limita el rendimiento de los cultivos. Además, la respuesta de los cultivos al déficit hídrico es una de las respuestas más tediosas de captar en la simulación de cultivos y los cambios de niveles, duración y periodo de ocurrencia respecto al déficit hídrico” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009).

2.1.5.4. Esquema de cálculo del modelo AquaCrop

La Figura 13 representa un esquema general de cálculo de AquaCrop, con un paso de tiempo diario, el modelo simula continuamente los siguientes procesos.

a. Balance hídrico del suelo

“La cantidad de agua almacenada en la zona radicular es simulada por la contabilidad de los flujos de agua entrantes y salientes en sus límites. En la siguiente figura, las flechas punteadas indican qué procesos se consideran, (desde a hasta e) y que afectan el estrés hídrico. CD^* es la cobertura del dosel, CD_{pot} es la cobertura del dosel potencial, K_s es el coeficiente de estrés hídrico, IC es el índice de cosecha, $K_{c,Tr}$ es el coeficiente de transpiración del cultivo, WP^* es la productividad hídrica normalizada y IC es el índice de cosecha” (Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E., 2009):

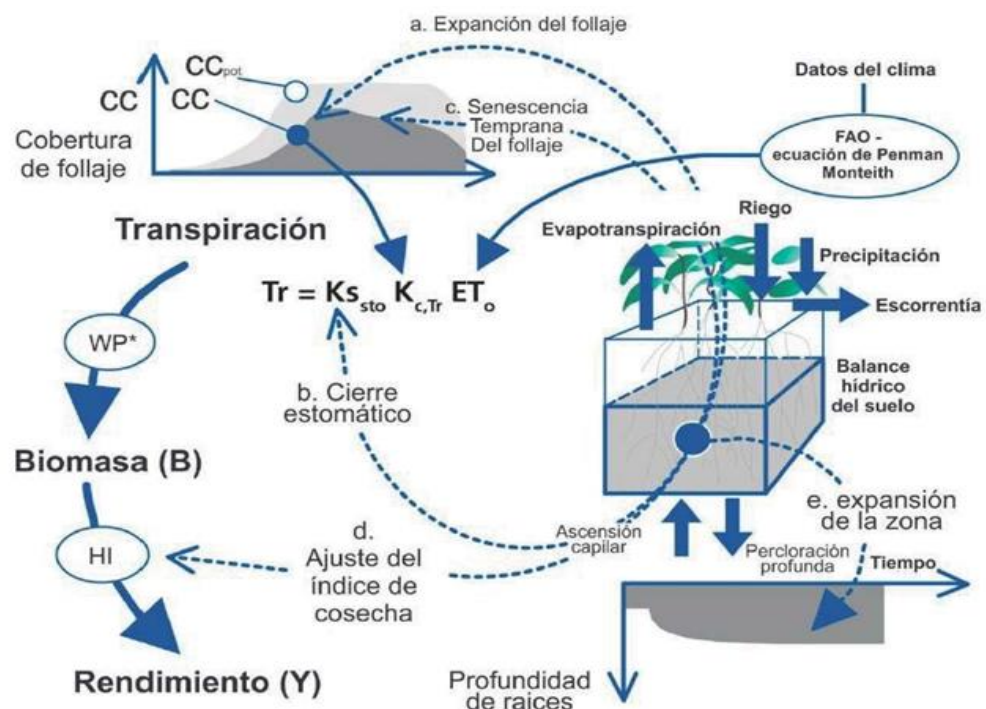


Figura 13. Esquema de cálculo general del Modelo AquaCrop.

Fuente: Raes et al. (2009).

- La expansión de la cobertura de copas (CC) de la planta verde,
- La conductancia estomática; que es, la transpiración (Tr) por unidad de CC,



- c. La senescencia de la copa de la planta y descenso,
- d. El índice de cosecha (IC) y
- e. El índice de profundidad del sistema radicular

b. El desarrollo del cultivo

En la simulación del crecimiento de la planta, la extensión apical se separa de la extensión de la rizosfera. La interdependencia entre brotes y raíces es indirecta por la escasez de agua. AquaCrop usa una tapa de corona para describirlo.

“El dosel o copa es una característica crucial de AquaCrop; que, a través de su expansión, envejecimiento, la conductancia y la senescencia; determina la cantidad de agua transpirada (Tr), la cantidad de biomasa producida (B) y el rendimiento final (Y). Si se produce el estrés hídrico, el CC simulado será menor que la cubierta de copas potencial (CC_{pot}) para ninguna condición de estrés y la profundidad máxima de enraizamiento podría no ser alcanzado” (Raes, et al. 2009).

c. Transpiración del cultivo (Tr)

Para obtener el valor de transpiración del cultivo es mediante el producto de la multiplicación de la potencia de evaporación de la atmósfera (ET_o) con un coeficiente de cultivo. El coeficiente de cultivo (K_{cb}) es proporcional a CC y por ende es ajustado frecuentemente. La energía de evaporación se expresa como la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) estimado de acuerdo a la ecuación de la FAO Penman-Monteith. “Cuando el estrés hídrico instiga al cierre de estomas, entonces el coeficiente de estrés hídrico de la conductancia estomática (K_s) rebaja la transpiración en consecuencia. La cobertura de copas o dosel verde y su duración representan la fuente de la transpiración, la conductancia estomática representa la intensidad de transpiración” (Raes, et al. 2009).



d. Biomasa aérea (B)

El volumen de agua transpirada (Tr) almacenada se refiere en la cantidad proporcional de la biomasa producida a través de la productividad de agua: “En AquaCrop, la productividad del agua de cultivos normalizado para el clima y el CO_2 (WP^*), expresa la fuerte relación entre la asimilación fotosintética de CO_2 o la producción de biomasa y la transpiración de forma independiente de las condiciones climáticas. Más allá de la división de la biomasa en rendimiento, no hay ningún fraccionamiento de la biomasa por encima del suelo entre los diversos órganos. Esta opción evita tener que tratar con la complejidad y las incertidumbres asociada con los procesos de partición, que siguen siendo uno de los menos entendidos y más difícil de modelar” (Raes, et al. 2009).

e. Partición de la biomasa en el rendimiento (Y)

Determinada la biomasa aérea (B) simulada: “se obtiene el rendimiento del cultivo con la ayuda de la Índice de Cosecha. En respuesta al agua y/o tensiones de temperatura, el índice de cosecha (IC) se ajusta continuamente durante la formación del rendimiento” (Raes, et al. 2009).

2.1.6. Procedimientos para la modelación en AquaCrop

“Los procesos que hacen parte del balance hídrico en el suelo están intrínsecamente relacionados con el desarrollo del ciclo del cultivo, sus etapas fenológicas y en lo que tiene que ver con la producción de biomasa, el desarrollo del dosel, el crecimiento de la profundidad de las raíces y desde luego con la obtención del rendimiento del cultivo” (Ordoñez, 2016).

2.1.6.1. Desarrollo del cultivo en simulación.

De acuerdo a Steduto et al. (2009), el “AquaCrop no simula el índice de área foliar (IAF). En lugar de ello, el desarrollo del follaje se expresa como la cobertura verde del dosel (CC), la fracción de la superficie del suelo cubierto por el dosel varía entre 0 (antes de la emergencia) a un máximo (CCX), que puede estar cerca del 100% dependiendo del tipo de cultivo y la densidad de siembra”. La cobertura dosel es la característica determinante de AquaCrop: “Su expansión, el envejecimiento, la conductancia y senescencia son las claves determinantes de la cantidad de agua transpirada, que a su vez determina la cantidad de biomasa producida” (FAO, 2018).

“El desarrollo del dosel para condiciones no limitantes (CC_{pot}) se basa en el uso de tres parámetros: la cobertura del dosel inicial después de la emergencia (CC₀), la máxima cobertura del dosel alcanzada (CCX), y el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC). Ecuaciones cinéticas de primer orden son utilizadas para simular el desarrollo del dosel. Bradford y Hsiao (1982), tras el inicio de la senescencia del dosel, la disminución del CC se simula con un coeficiente de descenso del dosel (CDC). Cuando el agotamiento de humedad en la zona radicular (Dr) cae por debajo de los umbrales de agua, el estrés afecta a la expansión del dosel, la K_s para la expansión del dosel (K_s exp) empieza a caer por debajo de uno para reducir la CGC efectiva, y el desarrollo del dosel se ralentiza. Cuando el Dr alcanza la parte superior del umbral por la senescencia acelerada dosel, CDC se incrementa en K_s sen, dando lugar a declives dosel más rápidos y más tempranos” (FAO, 2018).

2.1.6.2. Transpiración del cultivo en simulación (Tr)

Al tener la CC y el clima para cada día, la transpiración del cultivo (Tr) nos da el resultante producto de la multiplicación de ETo, (poder de evaporación de la



atmósfera), por $KCTr$ (coeficiente de cultivo) (Ecuación 6). La ETo es calculada en base a la ecuación Penman Monteith como se especifica por la FAO Riego y Drenaje No. 56 (Allen, et al.,1998), proporcionándose al modelo como variable de entrada. El coeficiente de transpiración del cultivo $KCTr$ es proporcional a la CC , pero se ajusta adicionalmente para la convección entre los surcos y la tendencia diurna de captación de radiación por el dosel, Steduto et al. (2009).

El máximo del factor proporcional ($KCTr,x$) varía entre 1.0 y 1.2 para diferentes cultivos agrícolas comunes. Cuando el Dr cae por debajo del umbral superior por reducción de la transpiración, Tr es simulado con el Ks por cierre de estomas (Ks_{sto}).

Ecuación 6. Tr

$$Tr = Ks (KcK_{Tr,x}CC^*)Eto$$

En donde:

Tr : Transpiración del cultivo mm/día

Ks : Coeficiente por estrés

CC^* : Cobertura del dosel ajustada %

$KTr,x CC^*$: Coeficiente del cultivo;

ETo : Evapotranspiración de referencia mm/día,

2.1.6.3. Simulación de producción de biomasa aérea (B)

“Utilizando WP^* , la productividad hídrica para producir biomasa normalizada, AquaCrop acumula la producción diaria de biomasa (B) hasta el final de la temporada



a partir de la transpiración (Tr) y la evapotranspiración diaria (ET_o) correspondiente” (Steduto, Hsiao, & Fereres, 2007).

El estrés hídrico, tiene un efecto insignificante en WP*, si los nutrientes no son limitantes, salvo en casos muy graves, por lo que el efecto sobre la biomasa aérea está relacionado en su totalidad por la reducción en Tr (Steduto & Albrizio, 2005).

Ecuación 7, que permite determinar el valor B:

$$B = WP * \sum \frac{(Tr)}{ET_o}$$

En donde:

B: Biomasa por encima del nivel del suelo [kg/m²];

WP*. Productividad del agua normalizada [g/m²];

Tr: Transpiración del cultivo mm/día; y

ET_o: Evapotranspiración de referencia diaria del cultivo mm/día.

La normalización de productividad de agua implica dos factores ambientales: “La demanda evaporativa de la atmósfera representada por la ET_o, y la concentración de dióxido de carbono del aire [CO₂] teniendo como año de referencia, el 2000. Estos dos factores tienen un impacto importante en la productividad del agua, definida como la ratio de biomasa producida (potenciada por el incremento de [CO₂]) a causa del agua transpirada. La normalización hace que WP* sea aplicable a diversos lugares y temporadas, ya que incluye las variaciones de ET_o, y en lapso de tiempo de años, incluye el aumento de [CO₂]. La normalización para la demanda evaporativa se obtiene dividiendo la Tr entre ET_o para cada día. La normalización de CO₂ aplica un multiplicador (f_{CO_2}), que depende de la ratio y la diferencia entre CO₂ en el año de



referencia arbitraria del año 2000 y del año cuando el cultivo fue sembrado. La CO_2 actual de cada año es el promedio medido en la estación del observatorio de Mauna Loa, Hawaii, EE. UU” (Xu & Hsiao, 2004).

2.1.6.4. Rendimiento de cultivo en simulación (Y)

Bajo el trabajo de Steduto, Hsiao y Fereres (2007), el “rendimiento del cultivo (Y) se determina como el producto de la biomasa (B) final y el índice de cosecha (HI). El HI real. El resultado se da ajustando, durante la simulación, el índice de cosecha de referencia (Hio) con un factor de ajuste (fHI) por efectos del estrés. Hio es la fracción de B que es cosechable cuando se observa que se encuentre en condiciones de no estrés y es uno de los parámetros específicos del cultivo”. Y se calcula como:

Ecuación 8, permite determinar el valor de Y:

$$Y = f_{HI}HI_oB$$

En donde:

Y, Rendimiento del cultivo [kg/m^2];

f_{HI} : Factor de ajuste por efectos de estrés;

HI: Índice de cosecha de referencia [%]; y

B: Biomasa por encima del nivel del suelo [kg/m^2].

El factor f_{HI} fluctúa de acuerdo a la extensión y el momento en el cual se origine el stress hídrico; así como de la temperatura durante el ciclo de cultivo. El estrés hídrico frecuentemente reduce el HI, contrariamente la inhibición del crecimiento vegetativo puede incrementar el HI, por la competencia por nutrientes de



los granos o frutos. El valor de f_{HI} fluctúa entre un máximo específico del cultivo de 1.6 hasta cero (fracaso completo).

“Durante la formación del rendimiento, f_{HI} es modelado para elevarse por encima de 1 cuando hay estrés hídrico leve que inhibe la expansión dosel pero que no es aún lo suficientemente fuerte como para provocar el cierre de estomas y reducir fotosíntesis. Así f_{HI} depende de Ks_{exp} y Ks_{sto} . Durante la floración, la polinización puede verse obstaculizada por la escasez de agua, el frío o el estrés por calor, cada uno con su propia función Ks , que resulta en una f_{HI} menor que 1, según la Ecuación 7” (Steduto, Hsiao, & Fereres, 2007).

2.1.6.5. Fases fenológicas del cultivo en AquaCrop

Como aspecto general, las divergencias entre las variedades de un cultivo se concentran respecto al tiempo de duración de sus etapas de desarrollo. Se requiere precisar el tiempo para alcanzar una etapa particular o el tiempo de duración en la variedad local. En la Figura 14 se representan estas etapas: tiempo para el 90% de emergencia de las plántulas, para iniciar la floración, para iniciar la senescencia del dosel, para la madurez fisiológica y la duración de la floración.

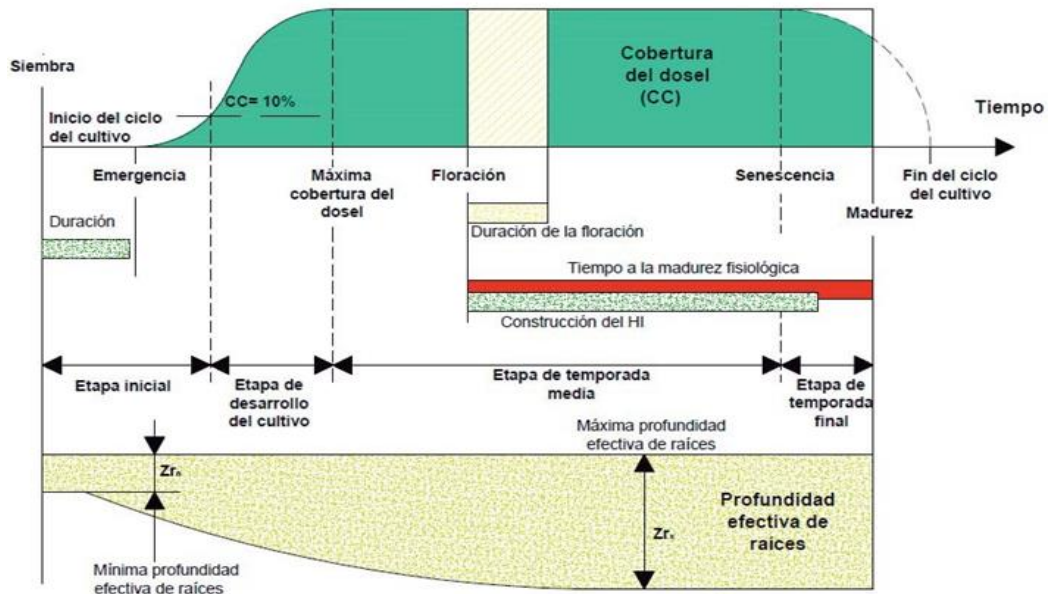


Figura 14. Representación esquemática de las etapas fenológicas del cultivo en AquaCrop.

Fuente: (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, *Crop yield response to water*, 2012)

a. Etapa inicial

Es necesario definir claramente la etapa, incluida la etapa de cultivo y la densidad de cultivo. También incluye el tiempo de emergencia, que es una indicación de que el 90% de las plántulas han emergido en el campo, y este tiempo probablemente sea una estimación en lugar de una especificación del número real de plántulas.

“Se precisa ajustar los valores simulados y medidos de cobertura del dosel (CC) con el fin de que coincidan en la etapa de plántula y al inicio de la estación. Ahora, los ajustes se implementan sólo después de que los parámetros conservativos relevantes (tamaño inicial del dosel por plántula y el coeficiente de crecimiento del dosel) se hayan parametrizado de manera adecuada y de que la densidad de la plantación se haya determinado” (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012).



Tan pronto como el valor del dosel alcanza el 10%, se completa la etapa inicial, en este momento las semillas en germinación pueden absorber agua y desarrollarse profundamente, y este proceso comienza después de la floración.

b. Etapa de desarrollo del cultivo

Las raíces profundizan en el suelo: “El tallo comienza un período de rápida elongación y la máxima cobertura del dosel (CCx) es alcanzada cuando el cultivo no se encuentra bajo condiciones de estrés. El crecimiento de la cobertura en esta etapa está condicionado por el parámetro conservativo, coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), que, al no ser conocido, será estimado al indicar el tiempo que la cobertura tarda en llegar a su máximo valor” (Danilo, 2005).

c. Etapa de temporada media

En este punto comienza el período de reproducción, siendo de suma importancia las fechas exactas hasta la floración y su sincronización, ya que se asocia a una subestimación o sobreestimación, alta acumulación del índice de cosecha (HI) que eventualmente conducirá a un rendimiento erróneo.

“El crecimiento de las raíces se ralentiza a diferencia del crecimiento exponencial en la etapa de desarrollo del cultivo, y llega a su valor máximo (Z_{rx}) casi al término de esta etapa. Y la etapa culmina al inicio de la senescencia del dosel, como resultado del amarilleamiento de las hojas, bajo condiciones óptimas sin estrés hídrico” (Alarcón, 2015).

d. Etapa de temporada final

Aquí la madurez fisiológica del cultivo es alcanzada, “AquaCrop utiliza como tiempo de madurez predeterminado el momento en que la cobertura del dosel se



reduce al 5% de la cobertura del dosel máxima alcanzada. También, los usuarios pueden cambiar el tiempo de madurez de acuerdo con sus propios datos de tal manera que se tenga un dato más sólido” (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012).

2.1.7. Balance hídrico de la zona radicular

Esquemáticamente la zona radicular es considerada como un pequeño reservorio de suelo (Figura 15). Al mantener un registro de fluido hídrico de entrada y salida en los límites de la zona radicular, la cantidad de agua que se retiene en esta zona se calcula por medio de un balance hídrico del suelo, en cualquiera de sus etapas.

El agua es añadida al “pequeño reservorio de suelo” por acción de lluvias y riegos. “Cuando la intensidad de la lluvia es demasiado alta, parte de la precipitación se puede perder por escorrentía superficial y sólo una fracción se infiltrará. El agua infiltrada no siempre puede ser retenida en la zona radicular. Cuando la zona radicular se encuentra demasiado húmeda, parte del agua del suelo se filtra fuera de la zona radicular y se pierde como percolación profunda. El agua también puede ser transportada hacia arriba a la zona radicular por el ascenso capilar de la tabla de agua subterránea poco profunda. Procesos como la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo eliminan el agua del embalse” (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012).

“Cuando se calcula el balance de agua en el suelo, la cantidad de agua almacenada en la zona radicular se puede expresar como una lámina de agua equivalente (W_r) o como el agotamiento en la zona radicular (D_r). El agua disponible total en el suelo (TAW) es la cantidad de agua retenida en la zona radicular, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En la capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular (D_r) es cero y, en el punto de marchitez permanente,

Dr es igual a TAW” (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, Crop yield response to water, 2012).

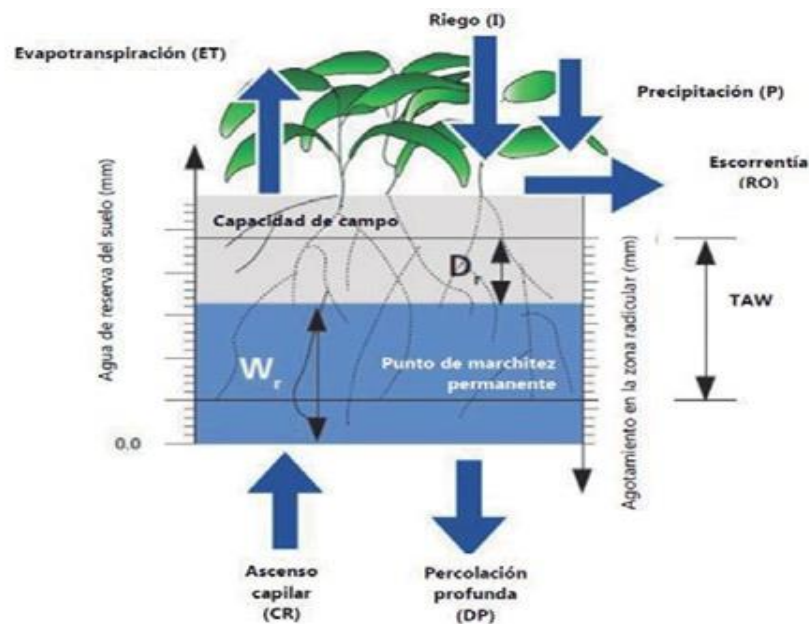


Figura 15. Zona radicular expresada como un reservorio.

Fuente: (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012)

Es así como indica que, el balance hídrico diario en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es determinado de la siguiente manera (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012):

Ecuación 9, es para determinar el balance hídrico radicular

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P-RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i$$

En donde:

$D_{r,i}$: Agotamiento de humedad en la zona radicular al final del día i [mm];

$D_{r,i-1}$: Contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm];

P_i : Precipitación en el día i [mm];

RO_i : Escurrimiento superficial en el día i [mm];

I_i : Lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm];

CR_i : Ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día i [mm];



ET_c: Evapotranspiración del cultivo en el día i [mm]; y

D_p: Pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda al día i [mm].

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Lugar experimental

El trabajo de investigación se desarrolló en la Comunidad Campesina de San Martín del distrito de Azángaro, provincia de Azángaro, región Puno; a 7 minutos en dirección sur este de la localidad de Azángaro. La campaña agrícola tomada fue del 04 de noviembre del 2017 al 27 de abril 2018.

3.1.2. Ubicación política

Políticamente se ubica en la localidad de la Comunidad Campesina San Martín, del distrito y provincia de Azángaro del departamento de Puno.

3.1.3. Ubicación geográfica

Con coordenadas latitud $14^{\circ}55'04.41''$ S, longitud $70^{\circ}09'39.77''$ O y altitud 3862 m.s.n.m. en la zona geográfica 19L. Además, el área de estudio limita por el norte con el río San Martín; por el oeste y sur con la carretera Azángaro - Yajchata; y finalmente por el este limita con el río San Martín.



Figura 16. Ubicación de la zona en estudio.

Fuente: Elaborado en base a Wikipedia y Google Earth Pro.



Figura 17. Lugar de estudio, parcela de cultivo de papa en la C.C San Martín del distrito de Azángaro.

Fuente: Google Earth Pro.

3.1.4. Antecedente histórico de cultivo del campo experimental

- Campaña agrícola 2015 – 2016, cultivo de avena
- Campaña agrícola 2016 – 2017, cultivo de quinua
- Campaña agrícola 2017 – 2018, presente experimento (Cultivo de papa).

3.1.5. Condición hidro climática

“La caracterización climática se realiza en estaciones meteorológicas cercanas a las zonas seleccionadas donde se tiene la información de cultivo necesario para realizar la adaptación del modelo de AquaCrop. Se referencia la zona de estudio, la estación climatológica utilizada y el material evaluado” (Cortés, C. 2013).

El campo experimental se encuentra a 2 km de la Estación Meteorológica Azángaro del SENAMHI, lo cual se optó por hacer uso de su información para realizar la caracterización climática e hidrológica del presente proyecto.

A continuación, en las Figuras 17, 18 Y 19 se puede observar el comportamiento de los promedios mensuales de temperaturas máximas y mínimas ($^{\circ}\text{C}$), así como la precipitación (mm) con un periodo histórico 1987-2018. que comprende desde el año 1987 hasta el 2018 (Anexos 01, 02, 03).

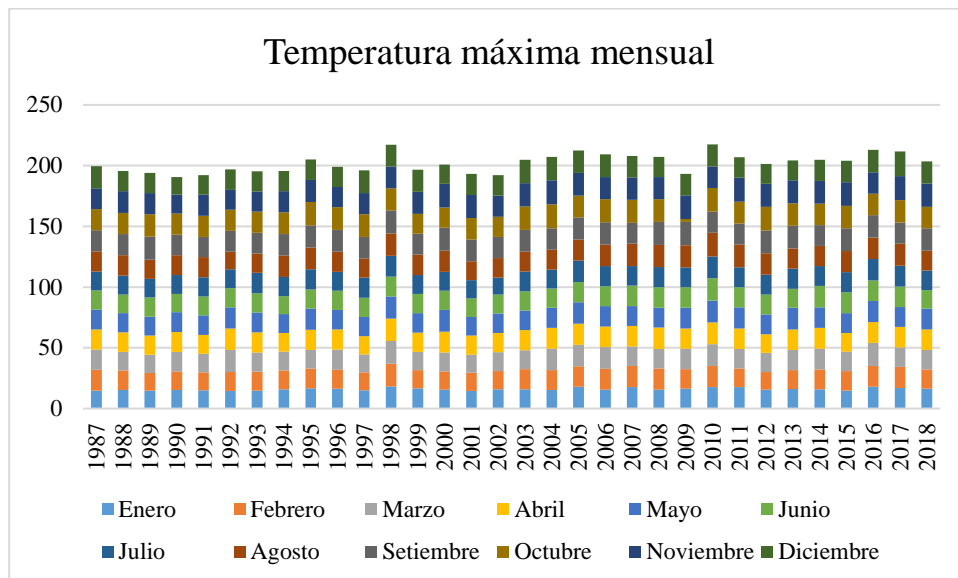


Figura 18. Datos de temperatura máxima mensual para la serie histórica de 1987 a 2018 - Estación Azángaro.

Fuente: Realizado en base a datos obtenidos de SENAMHI (Anexo 01).

Conforme a la Figura 18 vemos que en el período 1987–2018, las temperaturas máximas en el mes de enero varían de 14.6°C a 18.2°C ; en el mes de febrero las fluctuaciones máximas son de 14.6°C y 18.7°C ; en el mes de marzo varían entre 14.7°C y 18.9°C ; para el mes de abril fluctúan entre 15.2°C y 18.5°C ; para el mes de mayo varían de 15.4°C y 17.9°C ; en el mes de junio varían entre 14.9°C y 18.4°C ; en el mes de julio de 13.8°C y 17.8°C , en el mes de agosto varían entre 14.3°C y 18.5°C ; en el mes de setiembre entre 16.9°C y 19.3°C ; en el mes de octubre entre 16.4°C y 19.7°C ; en el mes de noviembre presenta una fluctuación de 15.6°C y 19.8°C y para el mes de diciembre entre 14.6°C y 20.2°C .

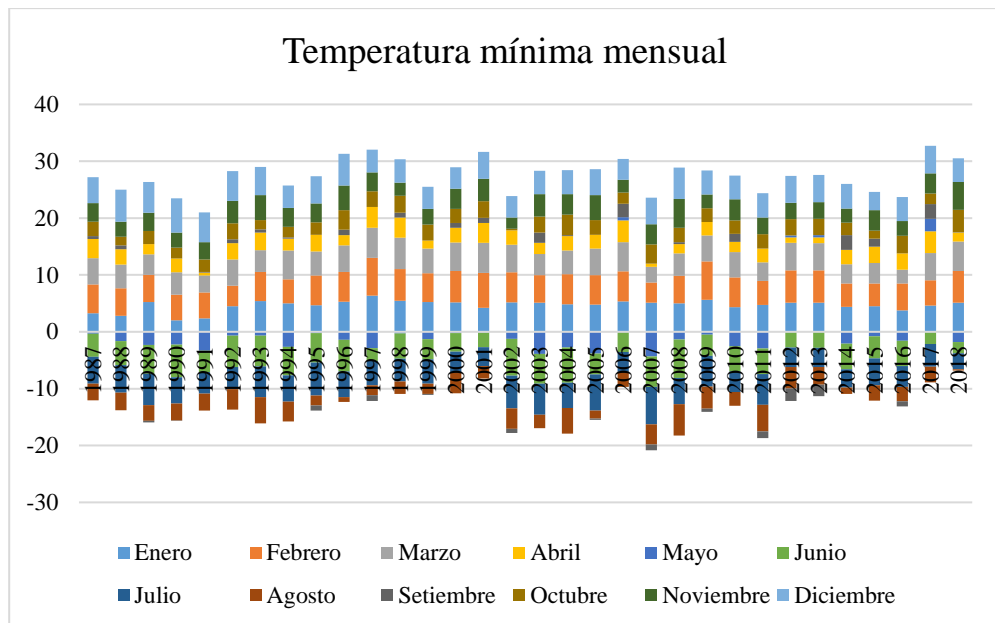


Figura 19. Datos de temperatura mínima mensual para la serie histórica de 1987 a 2018 - Estación Azángaro.

Fuente: Realizado en base a datos obtenidos de SENAMHI (Anexo 01).

Conforme a la Figura 18 vemos que en el período 1987 – 2018 las temperaturas mínimas en el mes de enero varían de 2.00 °C a 6.35 °C; en el mes de febrero las fluctuaciones máximas son de 3.54 °C y 6.80 °C; en el mes de marzo varían entre 2,98 °C y 5.55 °C; para el mes de abril fluctúan entre 1.00 °C y 3.82 °C; para el mes de mayo varían de -3.81 °C y 0.11 °C; en el mes de junio varían entre -6.79 °C y -2.02 °C; en el mes de julio de -6.62 °C y -2.77 °C, en el mes de agosto varían entre -5.52 °C y -0.22 °C; en el mes de setiembre entre -1.00 °C y 2.59 °C; en el mes de octubre entre 1.40 °C y 3.94 °C; en el mes de noviembre presenta una fluctuación de 4.95 °C y 1.96 °C y para el mes de diciembre entre 3.20 °C y 6.02 °C.

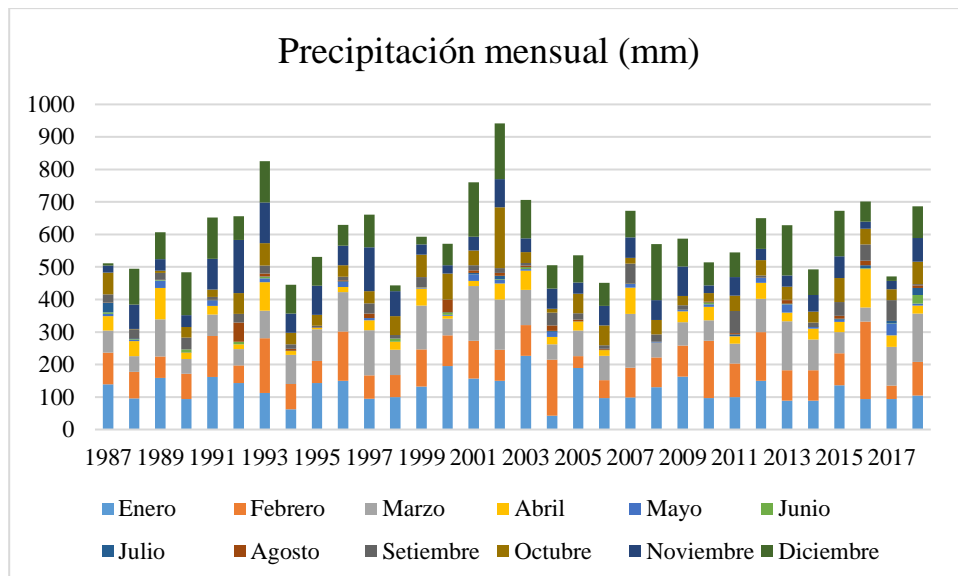


Figura 20. Datos de precipitación mensual en mm para la serie histórica de 1987 a 2018 - Estación Azángaro.

Fuente: Realizado en base a datos obtenidos de SENAMHI (Anexo 01).

Conforme a la Figura 20 vemos que en el período 1987–2018 las precipitaciones pluviales están mensualizadas en milímetros, para el mes de enero fue la mínima de 42.5 mm en el año 2004 y la máxima de 227 en el año 2003; en el mes de febrero la menor precipitación fue de 54.5 mm en el año 1992 y la máxima de 239 mm en el año 2016; en el mes de marzo fue la mínima de 42.5 mm en el año 2016 y una máxima de 168 mm en el año 2001; en el mes de abril la más alta precipitación fue de 96.2 mm en el año 1989, la más baja fue de 4.6 mm en el año 1995; para el mes de mayo la menor precipitación fue de 0.0 mm en el año 1998 y la máxima fue de 35.9 mm en el año 2017; en el mes de junio fue de 0.0 mm en el año 1995 y de 10.5 mm en el año 1998; en el mes de julio fluctuó entre 0.0 mm y 28.4 mm en el año 1991; para el mes de agosto fue de 0.0 mm en los años 1998, 2008, 2009 y 2017, y la máxima de 37.9 mm en el año 1990; para el mes de setiembre fue de 0.0 mm en el año 2010 y de 67.9 mm en el año 2011; en el mes de octubre fue de 0.95 mm en el año 1998 y de 69.3 mm en el año 1999; en el mes de noviembre fue de 22.2 mm en el año y de 163

mm en el año 1992; para el mes de diciembre se tuvo entre 6.75 mm en el año 1987 y de 171 mm en el año 2002.

Tener conocimiento del comportamiento climático – meteorológico de la zona en estudio fue imperante para determinar la calendarización de la fecha de siembra de cultivo del experimento, por lo cual se optó por iniciar la campaña agrícola el 04 de noviembre del 2017 posteriormente finalizó el 27 de abril 2018; además, para este periodo se tomó los datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

Tabla 4. Datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación pluvial que corresponden a la campaña agrícola 2017 – 2018, estación Azángaro.

AÑO - MES	TEMPERATURA (°C)		PRECIPITACIÓN
	Máxima	Mínima	PP (mm)
2017 - Noviembre	19.6	3.5	26.3
2017 - Diciembre	18.1	4.9	42.5
2018 - Enero	16.28	5.12	105
2018 - Febrero	15.93	5.56	102.6
2018 - Marzo	16	5.21	149.3
2018 - Abril	16.76	1.66	24.2

Fuente: Datos obtenidos de SENAMHI

Según la Tabla 4, a comienzos de campaña se tiene una temperatura máxima de 19.6 °C y una mínima de tiene de 3.5 °C, con una precipitación para el mes de noviembre 26.3 mm. Al término del periodo de la campaña agrícola se ha registrado los siguientes indicadores como son: temperatura máxima de 16.76 °C, temperatura mínima de 1.66 °C, y con una precipitación para el mes de abril de 24.2 mm.

3.1.6. Condición de agua, terreno y suelo.

Con lo que respecta a las condiciones de provisión de agua de régimen por seco, según indica (Ticona, 2017) el agua de lluvia del altiplano peruano presenta una conductividad eléctrica que oscila entre un mínimo de 11 $\mu\text{mho/cm}$ y un máximo



de 13 $\mu\text{mho/cm}$ desde noviembre a julio del año siguiente, y un pH que oscila entre un mínimo de 7 a un máximo de 7.2 unidades de grado de acidez a lo largo de noviembre a julio del año siguiente, ambos valores se encuentran clasificados como normales según los estándares de calidad ambiental ECA que establece que el pH normal para riego es de 6.5 a 8.4; y que en conclusión en agua de lluvia es apta para cualquier tipo de suelo y cultivo.

Con el fin de determinar las características físicas del parámetro suelo del área de estudio, se realizaron muestreos y posteriormente se realizó su análisis en el laboratorio de suelos.

El campo experimental tiene una superficie total de 150 m^2 constituidas por 3 parcelas de 50 m^2 cada una, cada parcela con una longitud de 10 metros de surco, con un total de 25 plantas por surco; un ancho de surco de 0.3 m. y un espaciamiento entre surcos de 0.35 metros; asimismo, un espaciamiento entre plantas de 0.40 m, podemos observar su composición estructural en la Figura 20.

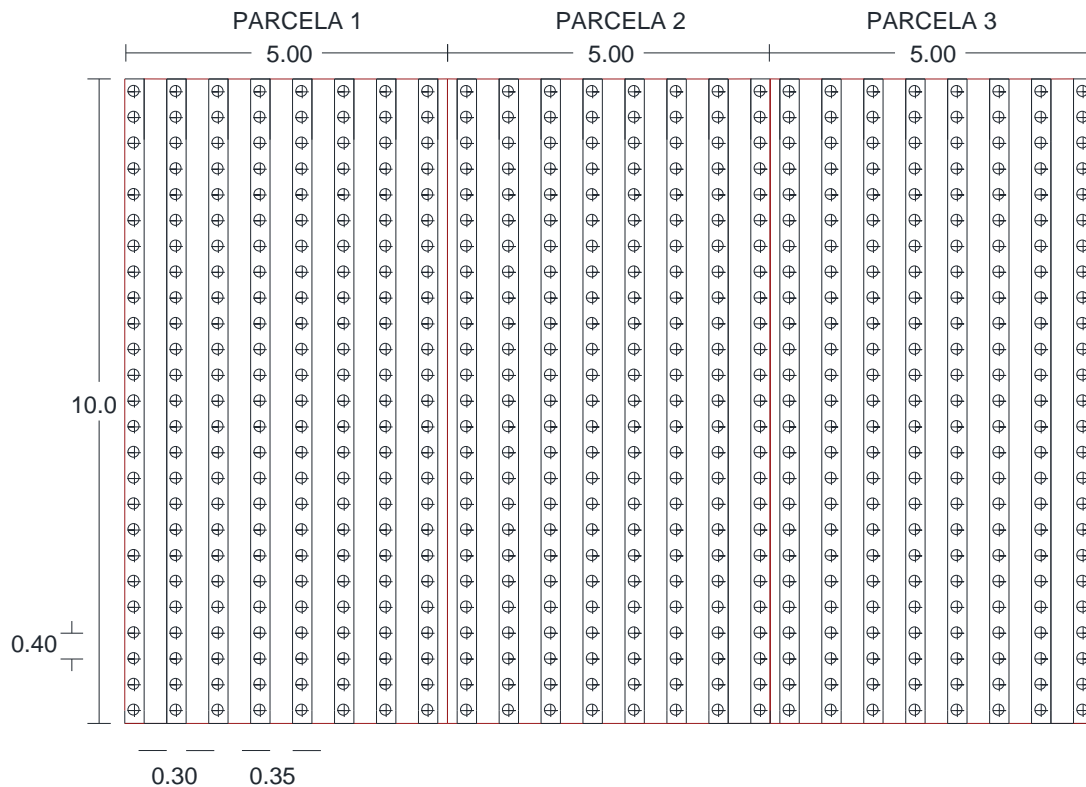


Figura 21. Disposición estructural de parcelas experimentales (3 parcelas).

Fuente: Elaboración propia en base a AUTOCAD.

Las características de campo experimental que se emplea en la presente investigación, se detallan a continuación, en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de campo experimental.

Campo experimental	Número
Área total (m ²)	150.00
Numero de parcelas	3.00
Área parcela (m ²)	56.00
Numero de surcos por parcela	6.00
Longitud de surco (m)	10.00
Espaciamiento entre surcos (m)	0.35
Distancia entre plantas (m)	0.40
Número de plantas por surco	25.00

Fuente: Elaborado por el autor.



3.2. MATERIAL EXPERIMENTAL

Los materiales que se emplearon en la investigación están clasificados en material genético, materiales de escritorio, materiales y equipos de campo y equipos gabinete, y herramientas software.

3.2.1. Material genético

Las plantas de papa, que pertenecen a la clase C3 (baja tasa de transpiración), requieren pequeñas cantidades de agua para obtener mayores rendimientos de biomasa, incluso si se usa riego insuficiente.

En lo que concierne a las variedades de papa con la cual se experimenta se trabaja con IMILLA NEGRA:

Variedad Imilla Negra, de acuerdo al trabajo de Seminario (2008): “Pertenece a la subespecie indígena. Origen sur del Perú (Apurímac). Se siembra sobre los 3,000 m en los departamentos de Huánuco, Pasco, Junín, Huancavelica, Apurímac. Poco en el norte. Planta medianas y altas, semi erectas, tallos numerosos, marrón verdoso, hojas verdes oscuro. Floración temprana, abundante, muy escasa o nula fructificación. Flores rojo intenso. Tubérculos redondeados o redondos, ojos semi profundos a profundos. Piel bicolor, áreas de color rojizo de borde definido y áreas amarillentas alrededor de los ojos. Pulpa amarillenta, brotes rojizos, con áreas cremosas en los nudos. Buen potencial de rendimiento, tubérculos numerosos de tamaño mediano a pequeño. Buena calidad 21 culinaria (hasta 22% de m.s.). Semi tardía (170 días). Tiene un rendimiento de cosecha de hasta 20 toneladas por hectárea, con tubérculos medianos y pequeños. Requiere suelos bien mullidos. Susceptible a verruga (*Spongospora endobioticum*) roña (*Spongospora subterranea*) y nematodo del quiste.

Tolera la racha, pero es susceptible a los golpes. Brota después de 2 a 3 semanas de ser cosechada” (Seminario, 2008).

A continuación, en la Figura 22; se detalla las características del inicio del periodo vegetativo del cultivo de la papa:

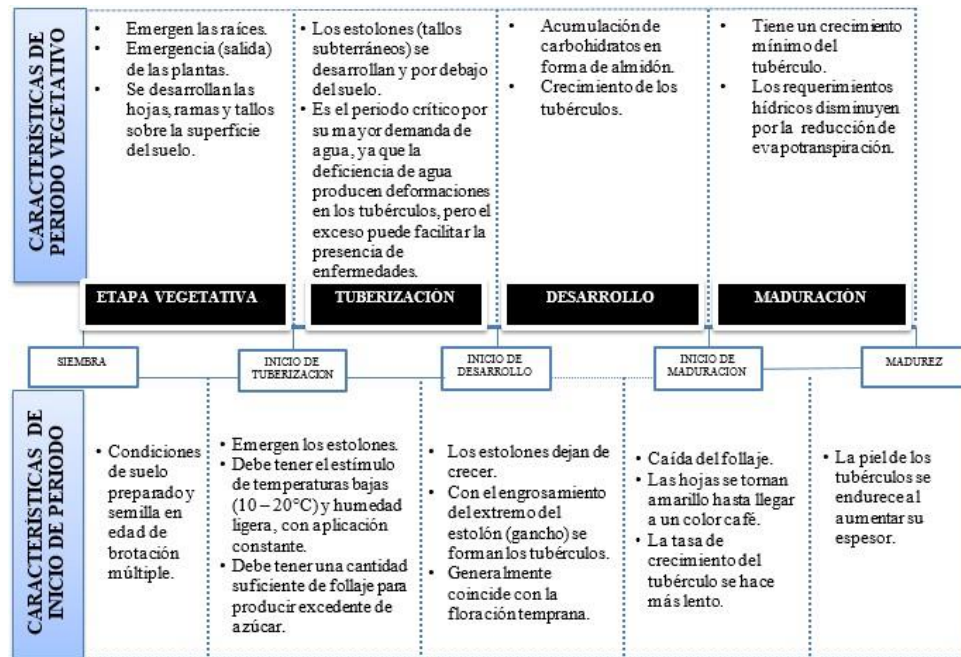


Figura 22. Características del periodo vegetativo de la papa.

Fuente: Epítome adaptado de (Egúsqüiza, 2000).

3.2.2. Materiales de escritorio

- Papel bond A4
- Tinta de impresora
- Materiales de escritorio (lapiceros, borrador, marcadores, entre otros)

3.2.3. Materiales y equipos de campo y gabinete

Los materiales y equipos de campo y gabinete son: Cuaderno de anote, datos de precipitación, humedad relativa y velocidad de viento, datos de clasificación de suelos, dispositivo Smartphone, laboratorios de análisis de agua y suelo, computadora o laptop, impresora multifuncional, cámara fotográfica, bibliografía necesaria y herramientas software.

A continuación, en la Tabla 9 se describe los softwares empleados en el presente trabajo con sus respectivas funciones que se desarrollan en la presente investigación.

Tabla 6. Herramientas software empleados para la presente investigación.

Software	Descripción
AquaCrop 6.1	Usado para simular el rendimiento del cultivo en el periodo de la campaña de estudio, para después simular el rendimiento con información climática futura.
ETo Calculator	Su principal función es calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) de acuerdo a los estándares de la FAO, y en un formato requerido por AquaCrop
R Software	Usado para generar imágenes interpoladas con datos meteorológicos futuros de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, a partir de estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones SENAMHI, para luego extraer la información necesaria ubicada en la coordenada de la estación Azángaro.
AutoCAD	Empleado para determinar el área de cobertura dosel a lo largo del periodo vegetativo.
Ms Excel	Empleado para realizar cálculos y elaboración de tablas.
Ms Word	Empleado para la redacción de la presente Tesis.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. METODOLOGÍA

Se presenta un esquema general de la metodología utilizada en el ajuste del modelo AquaCrop para el cultivo de la papa del distrito de Azángaro, debido a su representatividad en términos de producción de papa en toda la región de Puno. La selección de áreas de estudio obedecerá a la disponibilidad de la siguiente información:

Datos meteorológicos, datos de información de trabajos relacionados con las principales variables de cultivo e información de rendimientos por ciclo investigado, datos de suelo con fines agrarios, datos de riego y datos de rendimiento histórico observado de cultivo.

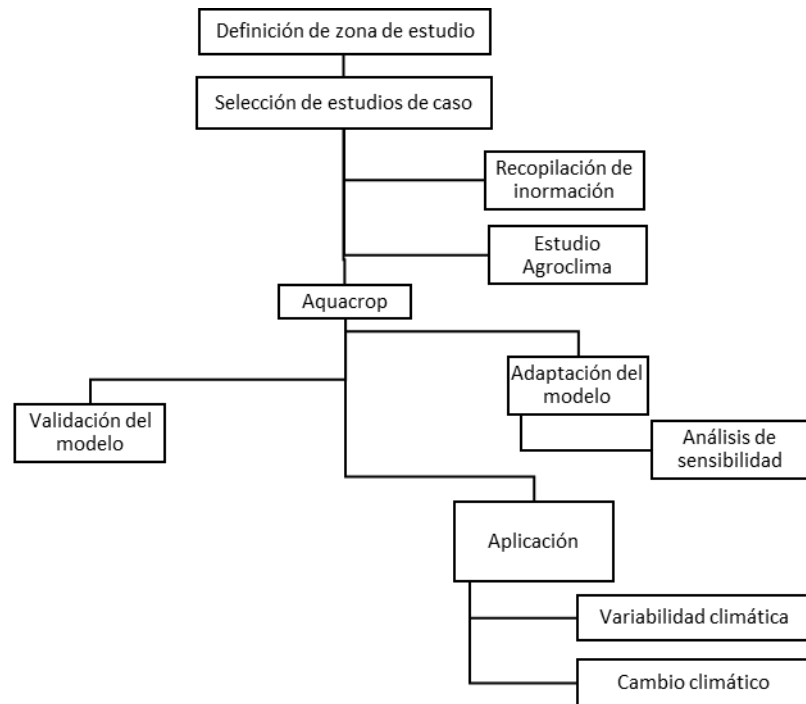


Figura 23. Esquema de la metodología utilizada.

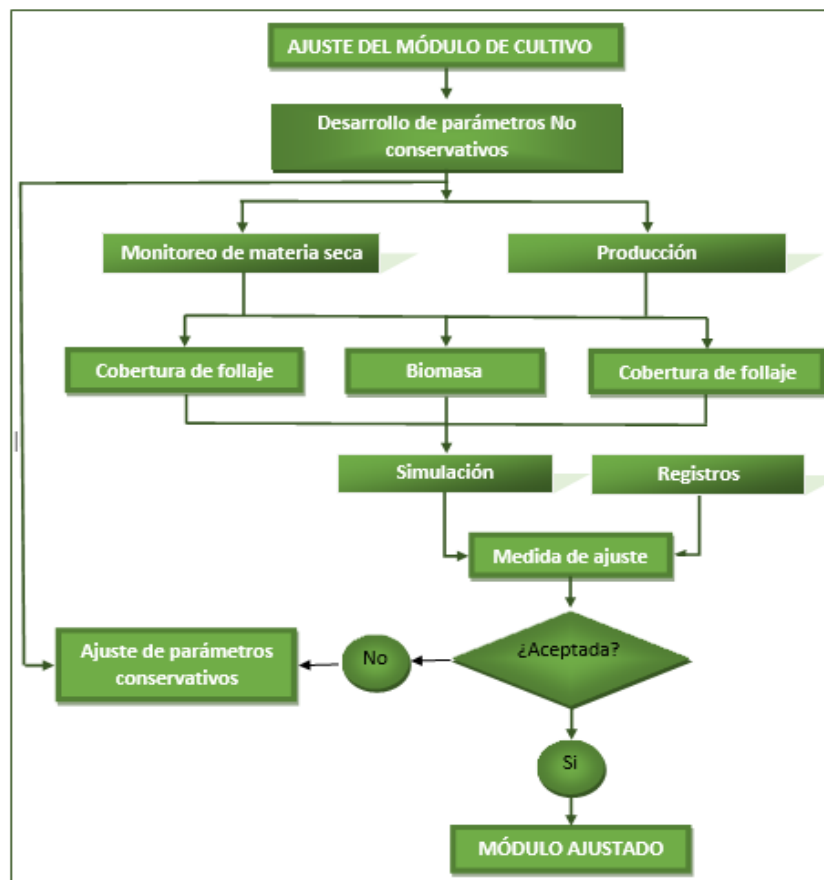


Figura 24. Diagrama de ajuste del modelo AquaCrop.

Fuente: Elaborado en base al autor en referencia (Cortés, C., 2013).



3.3.1. Rendimiento de cultivos

Se le llama rendimiento de un cierto cultivo a la relación de la producción total cosechado por hectárea de terreno utilizada, el cual se mide usualmente en toneladas métricas por hectárea (T.M./ha.), esta misma tiene dos componentes estructurales a las cuales se les llama “componentes de rendimiento” las cuales son:

- La cantidad de individuos existentes en una unidad de superficie (densidad de población).
- Producción particular de cada individuo

De estos componentes se derivan otros que tienen formas particulares de expresión para cada cultivo. Está relacionado con el rendimiento, en dependencia del cultivo que se trate. Sin embargo, para el cultivo de la papa y cultivos similares se utiliza los siguientes puntos:

- Número de plantas sembradas por unidad de área.
- Peso de tubérculos por cada planta.
- Número de folículos por planta.
- Peso por tubérculo, etc.

El rendimiento que puede proporcionar un cultivo depende de sus factores genéticos en términos de potencial de rendimiento, rusticidad y condiciones ambientales. La interacción de estos tres aspectos determina el rendimiento del cultivo, donde los rendimientos varían mucho en el tiempo y el lugar. Así, por ejemplo, un mismo cultivar produce de manera diferente de una región geográfica a otra debido a las diferentes condiciones climáticas, aun cuando los demás factores ambientales sean los mismos. Asumiendo condiciones climáticas iguales, el rendimiento puede variar dependiendo de las características del suelo.



Aspectos a considerar:

- Densidad de población
- Control de plagas, enfermedades y hierva silvestre.
- El ataque de plagas y enfermedades
- Factores medioambientales

La productividad de los cultivos está íntimamente relacionada con el comportamiento de los factores ambientales: clima, terreno, fisiología y organismos, que pueden afectar al cultivo desde tres puntos de vista: cuantitativo, cualitativo y genético.

Se sugiere, “el ambiente puede influir también en la capacidad de la semilla para servir como material de propagación de la especie, es decir, en el aspecto generativo del rendimiento. Es posible que determinadas condiciones ambientales favorezcan la cantidad y calidad de la cosecha, pero que afecten su capacidad generativa o su calidad como material de propagación” (EcuRed, 2016).

3.3.2. Rendimiento del cultivo de la papa

Los dos factores claves en el cultivo de papa son la cantidad de tubérculos por área, y tamaño y peso de cada tubérculo: “Un incremento en la producción se logrará con una cantidad óptima de tubérculos, una masa foliar que se mantenga verde, y un incremento en el tamaño y el peso de los tubérculos. Es importante tener un programa de Nutrición Vegetal que incluya todo los macro y micronutrientes para optimizar estos factores” (Meza, R. & Sánchez, M., 2015).

El Potasio es el elemento más consumido por el cultivo de papa, y junto con Nitrógeno se requiere en cantidades mayores para obtener rendimientos altos. “Las necesidades de Fósforo, Calcio y Magnesio son menores. La remoción difiere de un



campo a otro y depende de la producción, pero el cultivo de papa puede consumir 50% más Potasio que Nitrógeno: Como se puede ver de este gráfico, un cultivo de 35 t/ha podrá remover más de 200 kg/ha de Potasio y 115 kg/ha de Nitrógeno” (Yara, 2014).

3.3.3. AquaCrop como modelo de simulación

AquaCrop es un modelo de crecimiento del follaje que se enfoca principalmente en simular el crecimiento potencial de la biomasa de cultivos y los rendimientos cosechables en respuesta al agua disponible. El modelo simula el rendimiento potencial de los cultivos en función de la cantidad de agua consumida: “El modelo se centra en el agua, al ser éste uno de los principales determinantes de la producción agrícola y debido a que el crecimiento de la población y la creciente industrialización alrededor del mundo están demandando una cantidad cada vez mayor de agua, convirtiendo a este recurso finito cada vez más en un factor limitante de la producción agrícola” (Cortés, C., 2013).

Asimismo, AquaCrop: “Es un modelo que, utilizando un conjunto pequeño de parámetros y principios, logra describir de forma simple y directa los procesos que determinan la producción agrícola del cultivo y de esta manera hace más fácil el manejo del mismo por parte de un público bastante amplio” (Cortés, C., 2013).

En la interfaz principal de AquaCrop, “Se encuentran los módulos disponibles para realizar los ejercicios de simulación: En la parte superior, en el encabezado Environment and Crop, se encuentran cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelo, (los cuales serán descritos en la próxima sección). Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros” (Cortés, C., 2013).

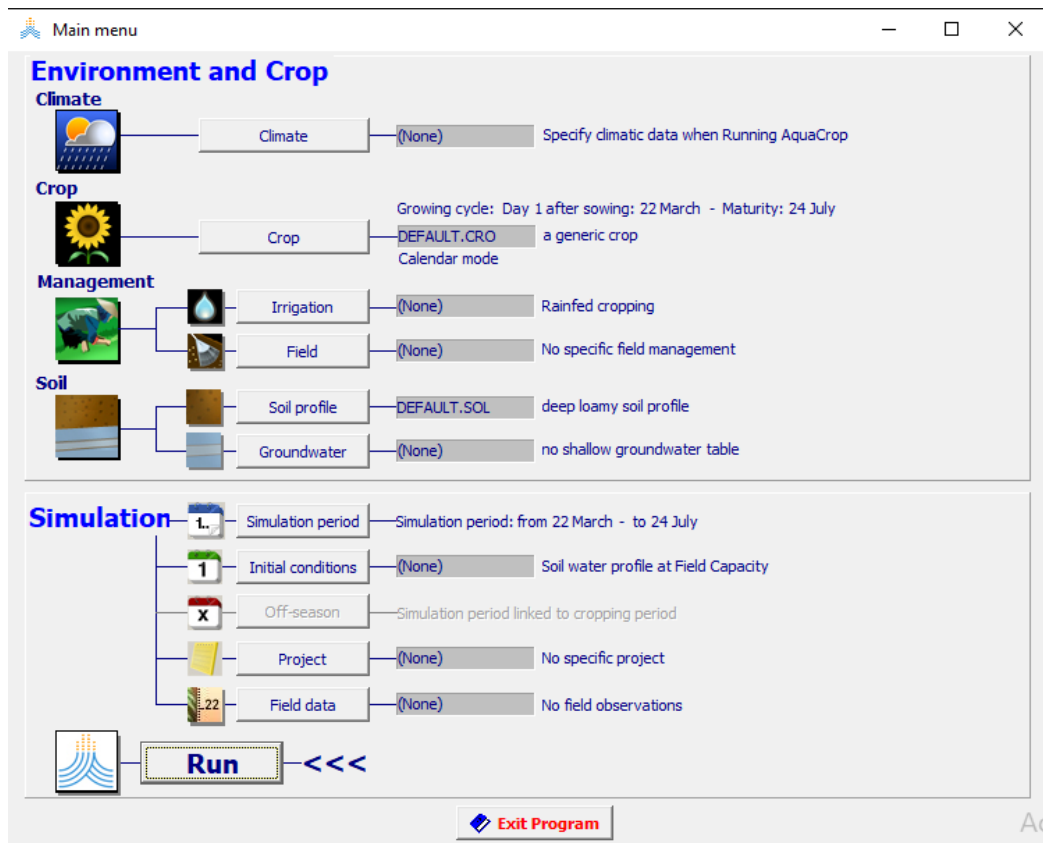


Figura 25. Interfaz principal del programa AquaCrop 6.1.

Fuente: Cortés, C., 2013).

A continuación, realiza una breve descripción de algunos de estos parámetros, los cuales serán objeto de discusión en posteriores secciones. En paréntesis después del nombre del parámetro se encuentra el módulo al cual pertenece cada parámetro en el modelo (Cortés, C., 2013).

- “Fecha de siembra (Cultivo): este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo” (Cortés, C., 2013)
- “Cobertura de dosel inicial, CCo (Cultivo): este parámetro se requiere para describir la expansión del dosel en los primeros días de sembrado y se obtiene como el producto de la densidad de la planta (número de plantas por hectárea) y del tamaño del dosel a la siembra. En AquaCrop, dado este último, el usuario específico bien sea la densidad de la planta o la cobertura del dosel inicial,

mientras que el programa determina el valor del otro parámetro automáticamente” (Cortés, C., 2013).

- “Cobertura del dosel máxima, CC_x (Cultivo): este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del dosel bajo condiciones óptimas” (Cortés, C., 2013).
- “Días a dosel máximo, Max CC (Cultivo): este parámetro especifica cuantos días se demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel” (Cortés, C., 2013).
- “Duración ciclo (Cultivo): Este parámetro permite especificar cuál es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo” (Cortés, C., 2013).

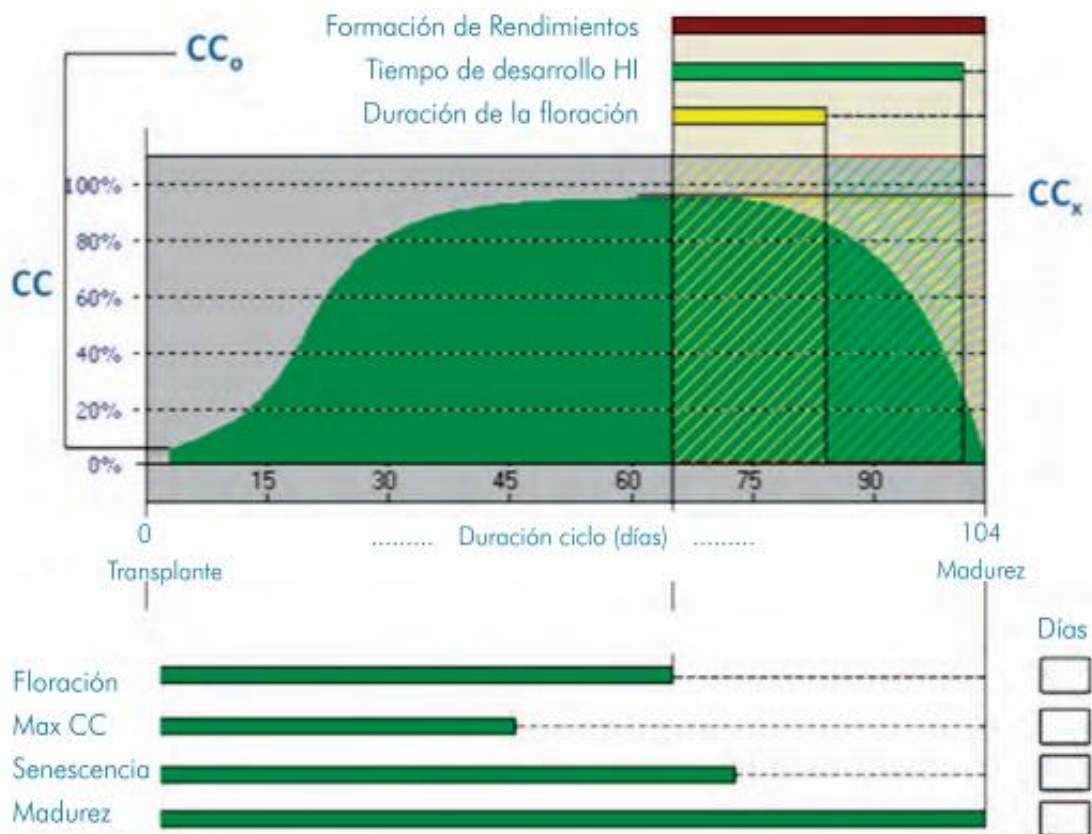


Figura 26. Algunas variables del módulo de cultivo, elaborado en base a las ventanas del software.

Fuente: (Cortés, C., 2013).



- “Índice de Cosecha (Cultivo): este parámetro establece una relación entre la biomasa y el rendimiento del cultivo. El usuario proporciona el índice de cosecha (HI) de referencia, pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés” (Cortés, C., 2013). Se determina a través de la ecuación 5, situada en la pág. 49 de este documento:

En donde:

Y: Rendimiento;

B: Biomasa;

HI: Índice de cosecha

- “Riegos (Prácticas de manejo): AquaCrop tiene un submódulo de riego que permite especificar las características del método de riego utilizado en el cultivo. Dentro de las opciones disponibles se puede especificar la no existencia de un método de riego manual (el agua en la zona de raíces proviene entonces de la lluvia), se le puede proporcionar al módulo un cronograma de riego específico (especificando la cantidad de riego por día) o se puede programar automáticamente el riego especificando una condición límite (por ejemplo aplicar una lámina de riego determinada cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable se agote en un porcentaje dado)” (Cortés, C., 2013).
- “Fertilidad (Prácticas de manejo): el porcentaje de fertilidad viene dado por la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Este parámetro puede ser calibrado analizando la razón entre una parcela del cultivo

bajo las condiciones normales de producción y otra con las condiciones óptimas” (Raes, D., & et Al., 2011).

- AquaCrop ha sido calibrado para varios cultivos (ver Tabla 7) en ciertas regiones del mundo y el usuario puede seleccionar y usar cualquiera de estas calibraciones.

Tabla 7. Cultivos calibrados previamente para AquaCrop.

Cultivo	Lugar
Maíz	Davis, USA
Papa	Perú
Quinoa	Bolivia
Trigo	Valenzano, Italia
Cebada	Tigray, Etiopía
Soya	Patancheru, India

Fuente: (Cortés, C., 2013).

“Una vez se han determinado los diferentes parámetros de los módulos puede obtenerse la producción de biomasa seca y el rendimiento cosechable en peso seco. Esta etapa de la simulación se logra por medio del módulo Simulation, a través de la opción RUN” (Cortés, C., 2013).

“En esta sección sólo se proporciona una descripción breve de AquaCrop, enfatizando aquellos elementos de mayor uso para la adaptación del modelo. Para mayor comprensión de la parte teórica y de manejo” (Cortés, C., 2013).

3.3.4. Descripción de módulo y parámetros a implementar

Dentro del modelo AquaCrop hay un conjunto de módulos que permiten importar variables externas, variables de estado y parámetros no conservadores (específicos de la región). A continuación, se presenta una descripción general de los requisitos tomados en cuenta durante la evaluación del modelo:



3.3.5. Módulo de clima.

Se utilizaron registros mensuales de las estaciones de la red meteorológica SENAMHI/DRD, para la campaña agrícola comprendida del 04 de Noviembre del 2017 al 27 de Abril 2018, se tiene precipitación, temperatura, máxima, mínima y evapotranspiración de referencia (ETo) por el método de evapotranspiración potencial (ETP) de referencia para la campaña en la que se obtuvo una T (°C) máxima de 22.4 °C y la T (°C) media de -0.2 °C, así mismo la T (°C) mínima se tiene de 11.1 °C, con una precipitación para el mes de noviembre 15.6 PP (mm), así mismo al periodo de culminación de la campaña agrícola se ha registrado los siguientes indicadores de precipitación, temperatura, máxima, mínima y evapotranspiración de referencia (ETo) T (°C) máxima de 17.6 °C y la T (°C) media de 1.4 °C, así mismo la T (°C) mínima se tiene de 9.5°C, con una precipitación para el mes de noviembre 46.2 mm.

Además, para la evapotranspiración se estimó con el modelo ETo Calculator por medio de registros diarios de las variables de temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y viento tomadas del SENAMHI/DR de la Estación Azángaro Tipo CO-Meteorológica.

“La ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específica, y no considera las características del cultivo, y los factores del suelo; este fenómeno resulta de la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo” (Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M., 2006). “Los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia (ETo) son parámetros climáticos. Por lo tanto, la ETo, también es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de los datos. AquaCrop no calcula la evapotranspiración



de manera directa; para ello en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ETo Calculator, desarrollado por la FAO, el cual es un módulo complementario del software AquaCrop y utiliza el método Penman-Monteith-FAO para obtener la evapotranspiración de referencia como función de variables climáticas y de la localización geográfica meteorológicos” (Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M., 2006).

3.3.6. Módulo de cultivo

Para adaptar el modelo AquaCrop, se realizaron simulaciones, inicialmente sin modificar los criterios de conservación del cultivo, y se comparó el rendimiento con la información de campo: “A su vez se evaluó estadísticamente el seguimiento de las variables agronómicas, biomasa seca, rendimiento del tubérculo e índice de cosecha y follaje (Canopy Cover), durante el ciclo de cultivo. De acuerdo a los resultados encontrados en el proceso de ajuste se han modificado algunos parámetros conservativos con el apoyo de los desarrolladores del modelo” (FAO, 2006).

a. Fases o estados de cultivo

La siembra del cultivo de papa, variedad Imilla Negra, se realizó el 04 de noviembre del 2017, a partir de ello se diferenciaron las etapas del cultivo, tales como: siembra, emergencia, inicio de tuberización, aporque, inicio de desarrollo, floración, crecimiento del fruto, cobertura de dosel máxima, inicio de senescencia, senescencia y finalmente maduración. El periodo de campaña agrícola para el cultivo fue de 175 días cosechándose el 27 de abril de 2018.

b. Evaluación de la cobertura del Dosel

AquaCrop, en la mayor medida posible, requiere información del desarrollo de la cobertura dosel (CC); dada su complejidad, se tomó medición semanalmente de acuerdo a los siguientes procedimientos:

- Se identificaron ocho plantas en el centro de cada una de las 3 parcelas experimentales, y se procedió a medir la cobertura del dosel (CC) durante todo el ciclo vegetativo. Utilizando el diseño experimental de bloque completo al azar.

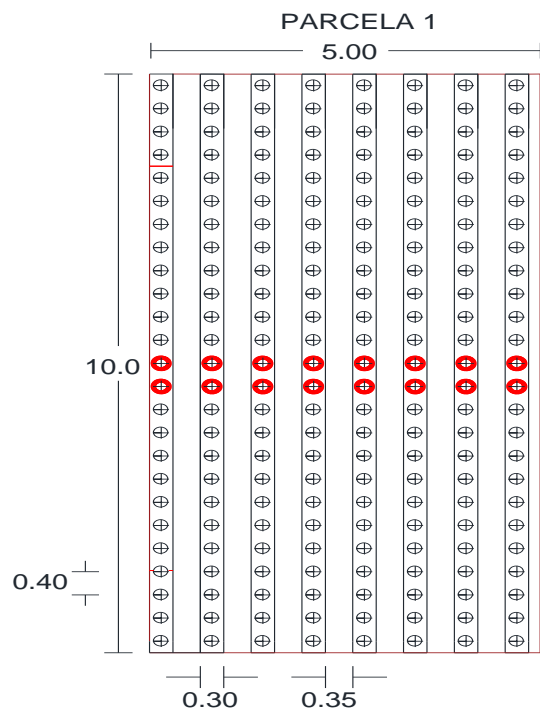


Figura 27. Distribución de plantas y tamaño muestral.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el tamaño de muestra se determinó mediante el método de poblaciones finitas para estimar la proporción poblacional (Carvajal, F. (2012). (Figura 27):

Ecuación 10. Estimación de proporción poblacional

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 N p q}{p q Z_{\alpha/2}^2 + (N - 1) e^2}$$

$$n = \frac{1.96^2 * 224 * 16.44^2}{16.44^2 * 1.96^2 + (224-1) * 5^2} = \frac{3.8416 * 224 * 270.2736}{270.2736 * 3.8416 + 223 * 25}$$

$$n = \frac{232,575.41}{31,532.08} = 7.37 = 8 \text{ muestras por parcela.}$$

En donde:

Nivel de confianza = 95%

Desviación estándar = 16.44

Error máximo tolerable = 5

d = 1.96 (error de muestreo en cifras absolutas) valor de Z al 95% de confianza.

- Se elabora un marco de madera de 100 cm x 100 cm, y se coloca en forma horizontal sobre cada cultivo seleccionado, luego de colocar el marco se toma una foto para registrarlo. La sesión de imágenes se tomó todas las semanas a partir de la emergencia del cultivo. (Figura 27).

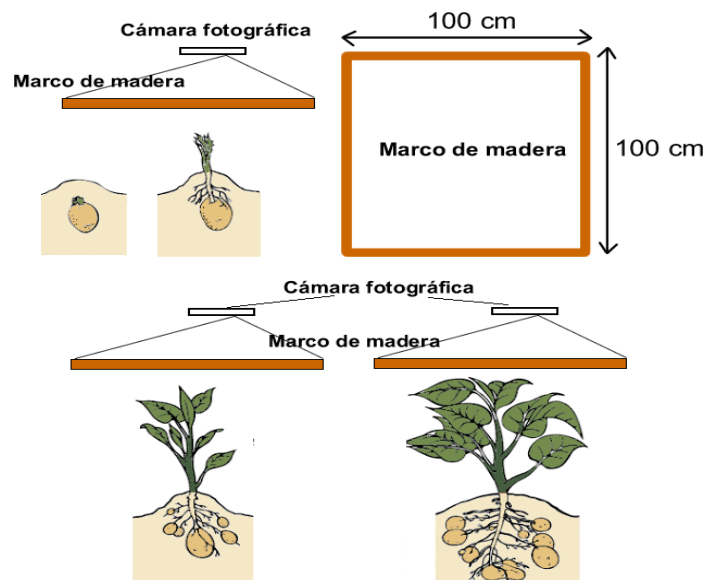


Figura 28. Medición de cobertura dosel.

Fuente: Elaboración propia

- Con la foto, se importa al software AutoCAD para proceder a escalar y determinar el perímetro de la planta dentro del marco de madera.

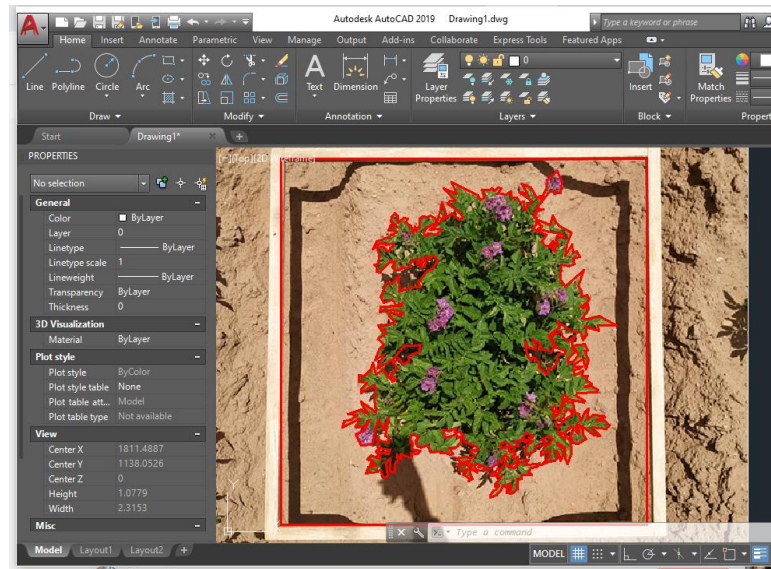


Figura 29. Escala y delimitación de cobertura dosel con el software AutoCAD.

Fuente: Elaboración propia.

- La delimitación de la cobertura dosel está basada por la relación entre el área cubierta por las hojas y el área total de referencia del marco.

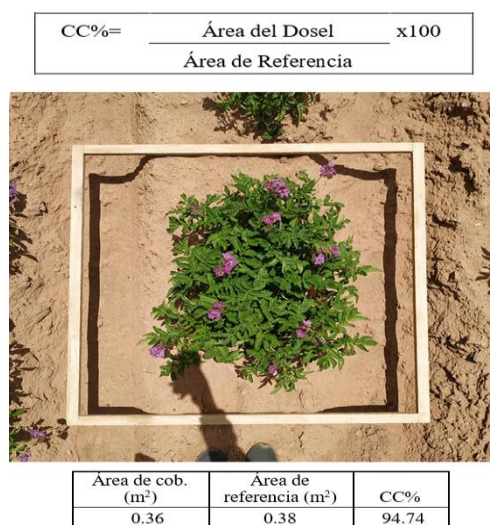


Figura 30. Cálculo de cobertura dosel en % (CC%).

Fuente: Elaboración propia.

- Con los datos de cobertura para todo el período de crecimiento, se traza una curva de desarrollo del dosel CC, para determinar los valores de CCo, CCD, CDx y CDD.
- Finalmente, la curva de dosel obtenida durante el muestreo de campo se comparará con la curva de dosel simulada por el modelo agrometeorológico AquaCrop, durante la calibración y validación.

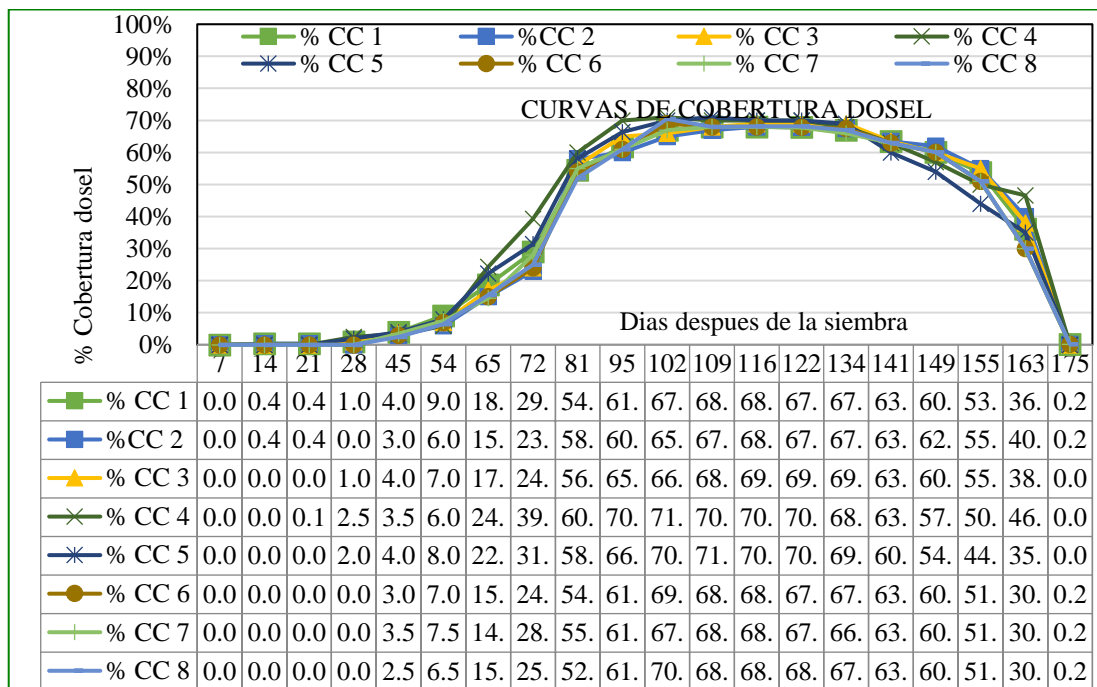


Figura 31. Grafico de CC vs Días después de la siembra DDS.

Fuente: Elaboración propia.

Con datos de cobertura de dosel para todo el período vegetativo y sus frecuencias, el valor promedio de cobertura de dosel, CC vs. Se ha graficado el tiempo, obtén el comportamiento de la curva, como se muestra en la Figura 31.

Se tiene a dos indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en AquaCrop:



- Calibración con lámina óptima(T_0): Cuando el experimento es sometido a condiciones normales de provisión de agua por secano, en donde se adquiere indicadores estadísticos más cercanos a los valores óptimos en comparación.
- Validación con lamina reducida (T_1): Condiciones de experimento sometido a condiciones hídricas reducidas.

c. Evaluación de profundidad de raíz y biomasa

Para la medida de las profundidades de raíces se realizaron 8 muestreos a lo largo del periodo vegetativo, con 3 repeticiones cada una, el primer muestreo se realizó a los 45 días después de la siembra (DDS), el segundo a 54, el tercero a 65, el cuarto a 72, el quinto a 81, el sexto a 102, el séptimo a 116 y el octavo a los 134. Se procedió a extraer la planta, luego de una breve y cuidadosa limpieza se estiró la raíz de mayor longitud para medirla con un flexómetro.

Así mismo, para obtener información de biomasa seca sobre el suelo, se realizaron tres muestreos, cada muestreo se repitió tres veces, el primer muestreo se dio a los 65 (DDS), el segundo muestreo fue en los 116 (DDS), y el tercer muestreo el día de la cosecha es decir a los 175 (DDS). El procedimiento consiste en extraer la planta a pesar, para posteriormente obtener el peso de la sustancia húmeda y luego secarla en un horno a 105 °C por 48 horas, finalmente se volvió a pesar para así obtener el peso de la materia seca. Para calibrar AquaCrop son necesarios datos de desarrollo de biomasa aérea seca.

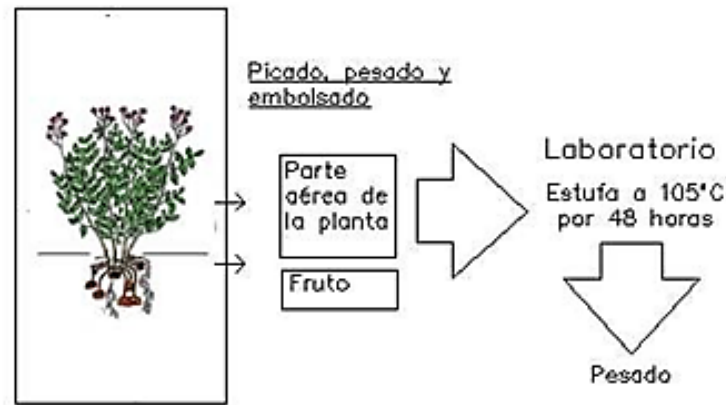


Figura 32. Proceso de obtención de biomasa seca de cultivo.

Fuente: (Ordoñez, C., 2016)

d. Evaluación de rendimiento de cultivo

Para evaluar el rendimiento se cosecharon tres hileras de cada campo, se determinó el peso (en gramos) de las papas extraídas de cada planta y luego se obtuvieron los datos biométricos de cada planta. Estos datos son los siguientes:

Cuantificación de unidades de papa cosechadas: realizó el proceso de conteo de papas de las plantas extraídas de cada área experimental.

Peso de papas cosechadas en campo: Consistió en registrar el peso (en gramos) de las papas extraídas de cada área experimental.

Deshidratación de las papas en laboratorio: se llevó a secar una muestra de papas en horno, durante 48 horas, posterior a ello se obtuvo la materia seca del tubérculo, en seguida se procedió a pesar la materia seca y de tal manera se obtuvo el peso en gramos.

Cálculo porcentual de humedad de papa: Se obtuvo una vez determinado el peso húmedo y peso seco, lo cual se halló la humedad promedio de la papa por cada parcela experimental.



Cálculo del rendimiento en campo: Se realizó la suma de los pesos de papa obtenidos de las tres filas de cada parcela para obtener el peso total de papa (en gramos) de cada parcela, y el área afectada de cada parcela es de 50 m^2 (porque la longitud del surco es 10 m, el espacio entre filas es de 0.95 m y se tiene un ancho de parcela de 5.0 m), finalmente el rendimiento se convierte de gramos por 50 m^2 a toneladas por hectárea.

Cálculo de rendimiento requerido por Aquacrop: Para calibrar el modelo en cuestión se debe tomar como dato el rendimiento seco de los cultivos, por lo que una vez obtenido el rendimiento del campo se reduce el porcentaje de humedad para obtener el rendimiento en toneladas de materia seca por hectárea.

3.3.7. Módulo de suelo

Para modelar cultivos en AquaCrop, se requieren datos característicos del suelo, como textura, capacidad de retención de agua en el campo, conductividad hidráulica, punto de marchitez permanente, densidad aparente y saturación.

Para la caracterización física del suelo, se tomaron y analizaron muestras en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano.

3.3.8. Módulo de riego

La calibración de un cultivo en AquaCrop; además, requiere datos característicos del riego como su tipo, en el caso de la zona en estudio es de tipo secano, donde la provisión de agua es por época de lluvias y no se considera el módulo de riego.

- Ajuste del modelo de AquaCrop

Se desarrolla siguiendo el esquema presentado en la Figura 27, haciendo uso de la información proporcionada por actores relacionados con el cultivo bajo estudio (Tabla 11). El ajuste del modelo AquaCrop para Azángaro – Puno, se llevó a cabo en el campo experimental en Azángaro a partir de información recopilada en las investigaciones realizadas, en el periodo del 04 de noviembre del 2017 al 27 de abril de 2018 con las organizaciones de productores ubicadas en la misma zona.

Tabla 8. Entidades que proporcionaron data para el proceso de ajuste para validar y aplicar el módulo de cultivo.

Módulo	Actores
Clima	SENAMHI
Cultivo	INIA, UNA-PUNO, DRA-PUNO
Suelo	INIA, DRA - PUNO
Manejo agronómico	INIA, UNA - PUNO

Fuente: Elaboración propia.

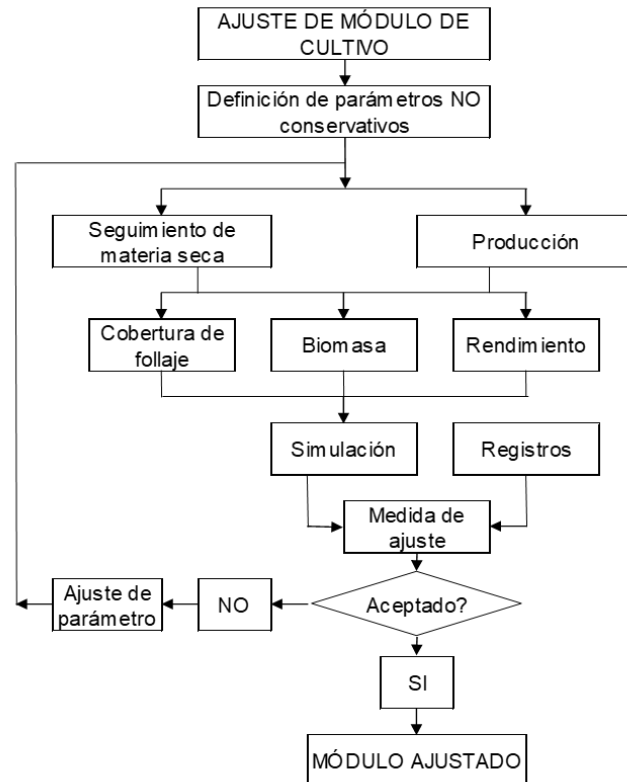


Figura 33. Esquema de ajuste del modelo AquaCrop.

Fuente: (Cortés, C., 2013).

Una descripción general del proceso de ajuste se aprecia en la figura 27. “El esquema de trabajo para el ajuste del modelo AquaCrop tiene como punto de partida la definición de los parámetros No Conservativos, los cuales son asignados de acuerdo a la disponibilidad de información de seguimiento agronómico en las distintas etapas del cultivo, de acuerdo a los registros de rendimientos históricos ya sea en biomasa o producto cosechado, o utilizando información secundaria. Una vez se cuenta con estos parámetros puede observarse el comportamiento de diferentes procesos o variables determinantes que caracterizan el proceso evolutivo del cultivo o su resultado final (cobertura de follaje, biomasa, rendimiento). Estos juegan un papel determinante en el proceso posterior a la simulación, pues son el criterio que permite aprobar o desaprobar el ajuste, en tanto que los valores simulados son comparados (hacia uso de una medida de ajuste apropiada) con los resultados obtenidos en campo, la



información histórica o la información secundaria que se tenga de los mismos. Si el ajuste obtenido no es el adecuado se procederá a cambiar algún o algunos parámetros conservativos para volver a iniciar el proceso descrito” (EcuRed, 2016).

Toda la información utilizada durante la instalación, validación y aplicación del modelo AquaCrop se resume en la Tabla 13, agrupada por la unidad a la que pertenece.

Tabla 9. Módulos de AquaCrop

Módulos de AquaCrop			
Cultivo	Clima	Suelo	Prácticas de Campo
Emergencia,	Precipitación,	Textura,	Grado de
Cobertura de Dosel inicial (o densidad de siembra),	Temperaturas	Número de Horizontes,	fertilidad del
Cobertura Máxima de dosel,	Máxima y Mínima,	Punto de Marchitez	suelo respecto
Inicio y duración de floración,	Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET _o),	Permanente,	al cultivo,
Senescencia,	Concentraciones de CO ₂ .	Capacidad de Campo,	Presencia de
Madurez fisiológica del tubérculo,		Punto de Saturación,	residuos de
Índice de Cosecha (HI),		Conductividad	cosecha,
Fecha de siembra,		Hidráulica Saturada,	Capa de agua
Método de siembra,		Curva Número (CN),	permanente
Temperaturas críticas (base y máxima)		Lámina rápidamente evaporable (REW),	sobre el suelo.
Profundidad Inicial y máxima de raíces,		Profundidad de capa restrictiva,	
Días a máxima profundidad de raíces,		Profundidad de nivel freático.	
Productividad de agua (WP).			

Fuente: FAO (2020). Uso del modelo aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta.

En efecto, se evaluó los archivos de entrada al modelo de cada uno de los módulos de manejo. En estos archivos se establecieron las variables de clima, cultivo, suelo y riego.

La calibración se realizó simulando el desarrollo de cobertura dosel, de acuerdo a las evaluaciones obtenidas en campo y a su lámina de riego (To), así pues, se ajustó de manera manual los parámetros de calibración que posee el modelo AquaCrop, de esa manera se ajustó la curva de desarrollo del dosel simulado a la curva generada tras

las evaluaciones en campo. La eficiencia de simulación se determinó de acuerdo a indicadores estadísticos de eficiencia. La evaluación de significancia y los intervalos de confianza de las relaciones de dependencia entre los datos evaluados en campo y los simulados por el modelo, tuvo un nivel de significancia (α) del 5% para la prueba t-student que se calcula mediante a ecuación:

Ecuación 11. Prueba t-student

$$Tc = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

En donde:

Tc: Indicador estadístico t-Student,

H₀: Determina si hay relación entre los datos observados y simulados, la cual se rechaza si $|Tc| > T_{1-\alpha/2}$,

$T_{1-\alpha/2}$: Es un punto de la distribución t-Student con $n-2$ grados de libertad y probabilidad de excedencia de $\alpha/2$.

Las simulaciones de rendimiento y biomasa han sido comparadas con las observaciones de campo en la cosecha.

La calibración de modelo tuvo los siguientes parámetros:

- Promedio de CC de plántulas al 90 % de emergencia.
- Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés.
- Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés.
- Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés.



- Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) y disminución del dosel (CDC).
- Productividad del agua normalizada por ETo y CO₂ (WP*), índice de cosecha de referencia (HIo).
- Los indicadores estadísticos de eficiencia utilizados para el proceso de calibración y validación fueron:

- **Coeficiente de correlación de Pearson (r):**

“El coeficiente de correlación de Pearson (r) es un índice de dependencia lineal que mide el grado de relación entre los valores observados y simulados; sus valores adimensionales varían de menos uno a uno” (Hirsh, Helsel, Cohn, & Gilroy, 1992).

Ecuación 12. Coeficiente de correlación Pearson (r).

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

En donde:

r: Coeficiente de correlación de Pearson;

σ_{xy} : Covarianza de “x, y”, y,

$\sigma_x \sigma_y$: Desviación estándar de “x” e “y”.

- **Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE):**

Se utilizó la raíz del error cuadrático medio, normalizado con el valor medio de la variable observada (Normalized Root-Mean Square Error, NRMSE), con el fin de tener una medida independiente de la variable o la magnitud de ésta. “Un NRMSE inferior al 10% puede ser considerado como excelente, bueno si se encuentra entre 10% y un 20%, aceptable para un porcentaje entre 20% y 30% y mala si es mayor de un 30%” (Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2012).

Ecuación 13. NRMSE (1).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} * 100$$

O_{med}

En donde:

NRMS: Error medio cuadrático normalizado [%];

O_{med} : Media de los datos observados;

RMSE: Error medio cuadrático [unidades de la variable analizada].

Ecuación 14. NRMSE (2)

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5}$$

En donde:

P_i : Valores predichos;

O_i : Valores observados y

n : Cantidad de datos registrados.

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E):

La prueba de calidad de la aproximación del modelo de Nash y Sutcliffe (1970), eficiencia del modelo (E, no dimensional). Del mismo, hace mención que este, “Es un estadístico normalizado que determina cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación” (Moriasi, 2007).

Ecuación 15. Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \right]$$

En donde:

E: Eficiencia de Nash – Sutcliffe;

P_i : Valores simulados o predichos;

O_i : Valores observados; y

O: Promedio de los valores observados.

“Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$ ”. Valores sugeridos para la toma de decisiones en función al valor de E son resumidos en la Tabla 12 según Molnar (2011).

Tabla 10. Calificación de la eficiencia de modelación según el índice de Nash – Sutcliffe (E)

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Molnar (2011).

Este indicador puede ser utilizado para cualquier escala de tiempo. Cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele utilizar la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe”.

Ecuación 16. Eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe.

$$E_{log} = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(P_i))^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(O))^2 \right]}$$

En donde: sus elementos, (P_i , O_i , O), son los mismos que los de la Ecuación 15.

- Índice de ajuste de Willmott (d):

“Mide el grado de acercamiento de los datos observados a los datos estimados. Representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial, el cual es definido como la suma de los cuadrados de los valores absolutos de las diferencias de

los valores simulados a los observados medios y las diferencias de los valores observados a los observados medios” (Willmott, C., 1984).

Los rangos están entre 0 y 1, con 0 indicando un nulo ajuste y 1 un perfecto ajuste entre los datos estimados y los observados.

Ecuación 17. Índice de ajuste de Willmott.

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2}$$

Dónde: sus componentes, (P_i , O_i , O), son los mismos que los de la Ecuación 15.

La validación incluye simular el desarrollo de la cobertura del dosel utilizando el modelo AquaCrop que ha sido calibrado, haciendo uso de observaciones de campo obtenidas de parcelas irrigadas por secano, para el seguimiento entre las curvas del dosel simuladas y la comparación observada. En el dosel, la eficiencia del modelado se mide con base en los indicadores estadísticos de eficiencia antes mencionados. Para evaluar la significancia y el intervalo de confianza de la dependencia entre los datos de cobertura de dosel medidos en campo y los datos de cobertura de dosel simulados por el modelo agrometeorológico AquaCrop, se utilizó la prueba estadística t-Student para obtener el nivel de significancia (α) del 5%. El rendimiento y la biomasa simulados por el modelo también se compararon con las observaciones de campo obtenidas en el área experimental en el día de la cosecha.

A continuación, se verificó el tiempo del modelo agrometeorológico AquaCrop y se simuló el rendimiento utilizando información climática histórica, y estos rendimientos simulados se compararon con los rendimientos históricos obtenidos de la Dirección Regional Agraria (DRA), Agencia Agraria Azángaro y el Ministerio de Agricultura, así mismo, información de Tesis desarrollados por en la Universidad



Nacional del Altiplano. Para evaluar la significancia y el intervalo de confianza de la dependencia entre el rendimiento histórico y el rendimiento simulado por el modelo agrometeorológico AquaCrop, se utilizó una prueba T estadística para probar el nivel de significancia (α) del 5%.

3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para comprender la sensibilidad del modelo a cambios en las características ambientales, y cómo la sensibilidad afecta la producción de biomasa y/o rendimiento, con base en ajustes experimentales previos en la zona de estudio, algunos de los principales modelos de entrada del modelo son: Tiene ha sido modificado dentro de un alcance específico para observar cómo cambian los rendimientos de los cultivos (Cortéz, 2013). Todas las comparaciones de cambio porcentual realizadas son relativas al valor del rendimiento final durante la fase de ajuste del modelo. Se realizó un análisis de sensibilidad en las siguientes entradas:

- Diferentes láminas rápidamente aprovechables (RAW) y láminas netas.
- Nivel freático.
- Nivel de fertilidad del suelo.
- Comportamiento del modelo AquaCrop variando las propiedades hidrofísicas del suelo en una textura franca.

3.5. VALIDACIÓN DE AQUACROP

“La validación del modelo es el proceso de demostrar que se están simulando apropiadamente los procesos físicos dominantes en un sitio específico, siendo capaz de realizar predicciones que satisfagan los criterios de precisión previamente establecidos. Posterior al proceso de calibración, se procede a validar los resultados

obtenidos por el modelo, esto se hace comparando los resultados simulados con datos observados” (Velásquez, E., 2008).

3.6. PROYECCIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO

Luego de realizar la calibración y validación del modelo y una vez obtenidos los indicadores de eficiencia que más favorecen en el periodo noviembre 2017 a abril 2018, se proyectó la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de la papa para el periodo 2023 – 2050 para el análisis de los efectos del cambio climático, con los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA, las características de los escenarios de cambio climático que se hace uso en este trabajo están detalladas en la Tabla 2 de este documento.

En consecuencia, se obtuvo las variables climáticas para la serie 2023-2050 a escala diaria para luego, determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la fórmula de Hargreaves y Samani (Gómez, J. & Cadena, M. 2017) mediante la información de Temperaturas medias, así como de la radiación solar (Ecuación 18).

Ecuación 18. Fórmula Hargreaves y Samani.

$$ET_o = 0.0135 (T_{med} + 17.78) R_s$$

En donde:

ET_o: Evapotranspiración de referencia diaria [mm/día];

T_{med}: Temperatura media [°C]; y

R_s: Radiación solar incidente [convertida en mm/día].

Al no tener datos proyectados para el parámetro de Radiación solar, se le considera con valores promedios constantes para el periodo 2023-2050, de acuerdo los datos observados.

“La radiación solar incidente, R_s , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R_0 , y la leemos en tablas en función de la latitud del lugar y del mes” (Samani, Z., 2000).

- Cálculo de radiación solar incidente (R_s)

Según la propuesta se tiene la siguiente expresión (Samani, Z., 2000):

Ecuación 19. Radiación solar incidente (R_s).

$$R_s = R_o * KT * (T_{máx} - T_{mín})^{0.5}$$

En donde:

R_s : Radiación solar incidente;

R_0 : Radiación solar extraterrestre (tabulada);

KT : Coeficiente;

$T_{máx}$: Temperatura diaria máxima; y

$T_{mín}$: Temperatura diaria mínima.

Debido a que SENAMHI proporcionó los valores de las temperaturas máximas y mínimas y que los valores de R_0 están tabulados, se tuvo una única dificultad para aplicar esta sencilla expresión en el coeficiente KT . Para evaluar la Radiación Solar Extraterrestre (R_0) se utilizó una tabla que relaciona la latitud y el mes de R_0 . Esta tabla está en unidades $MJ/m^2/día$ y para pasar a $mm/día$ (de agua evaporada), de acuerdo a Allen, et al (1998) se multiplicó por el valor 0.408,

En la ecuación 19, el coeficiente KT es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, sin embargo, Hargreaves, citado en (Samani, Z., 2000), recomienda distinguir un valor de $KT= 0.19$ para regiones costeras y $KT= 0.162$ para regiones no costeras, es decir del interior.

Sustituimos del valor de R_s de la ecuación 19, en la ecuación 18, y tomando para el coeficiente KT el valor medio de 0.162, resulta la expresión citada con más frecuencia en la bibliografía:

Ecuación 20. Valor ET_o

$$ET_o = 0.0023 (T_{med} + 17.78) R_o * KT * (T_{máx} - T_{mín})^{0.5}$$

Donde los componentes de la Ecuación 20, (ET_o , R_o , T_{max} , $T_{mín}$, T_{med}), son los mismos que los de las ecuaciones 18 y 19.

Al tomar la ET_o de cada fecha de simulación futura, se podría haber completado el perfil climático de AquaCrop y, luego, se realizaron las ejecuciones del modelo para los seis escenarios de cambio climático. Para analizar los resultados se monitoreó el cambio en rendimiento y ET_o evaluados con respecto al período vegetativo.

a) Efecto del cambio climático en las proyecciones climáticas de PP, T max y T min

Los datos de Precipitación y Temperaturas fueron generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA, por punto, para la latitud y longitud, -14.91 y -70.19 respectivamente, a una resolución de 20km continental histórico y proyectado, la cual, se sostiene bajo el trabajo de (Chou, y otros, 2014) denominado “Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios”, adicionalmente “Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models” y del mismo modo, el trabajo de (Lyra, y otros, 2018) “Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution” en la que obtuvo datos para un conjunto de seis posibles escenarios en el periodo 2023 – 2050.

Una vez obtenida las proyecciones climáticas, de los modelos climáticos regionales Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 y Eta-MIROC5 para los escenarios optimista y pesimista, RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente se procedió a corregirlas en base a los datos históricos observados (2006 – 2021) obtenidos de la estación meteorológica Azángaro (SENAMHI), finalmente se corrige en el enfoque de escala lineal (Lenderink et al., 2007), el ajuste se operó con valores de corrección mensuales basados en las diferencias entre los valores observados y los simulados en la actualidad. Por definición, las simulaciones RCM corregidas coinciden en sus valores medios mensuales con las observaciones.

La precipitación se corrige con un factor basado en la proporción de la media mensual observada a largo plazo y los datos de la ejecución de control.

Ecuación 21. Factor de corrección para datos de precipitación

$$P_{contr}^*(d) = P_{contr}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right]$$

Ecuación 22. Corrección de sesgos en escala lineal de precipitación

$$P_{scen}^*(d) = P_{scen}(d) \cdot \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right]$$

La temperatura se corrige con la ayuda de un término aditivo basado en la diferencia de la media mensual a largo plazo observada y los datos de ejecución de control, se sobrentiende que los factores de corrección aplicados y los sumandos permanecen invariables incluso para condiciones futuras (Lenderink, Buishand, & willem, 2007).

Ecuación 23. Factor de corrección para datos de temperatura

$$T_{contr}^*(d) = T_{contr}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d))$$

Ecuación 24. Corrección de sesgos en escala lineal de temperatura

$$T_{scen}^*(d) = T_{scen}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d))$$

Finalmente, se procede a promediar los resultados de los tres modelos proyectados para obtener series de datos para dos escenarios de cambio climático (2023 – 2050).

b) Efecto del cambio climático en las proyecciones de la evapotranspiración.

Con los datos proyectados de temperaturas máximas y mínimas se proyecta la cantidad de evaporación para el periodo (2023-2050) y con la información climática histórica para el periodo (2006-2021) se estima la evaporación histórica. El impacto del cambio climático sobre la evapotranspiración se determinó comparando la ETo proyectada (2023-2050) con la ETo histórica (2006-2021). El análisis se realizó con base en el cambio porcentual en la evapotranspiración pasada y el cambio porcentual en la transpiración futura en relación con la transpiración pasada.

c) Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo.

El perfil climático requerido fue generado por el modelo agrometeorológico AquaCrop 6.1 para el período (2023 – 2050), seguido de una simulación de cultivo de papa variedad Imilla Negra. Luego de obtener los rendimientos de seis escenarios de cambio climático, se determinó el impacto del cambio climático en el rendimiento de papa variedad Imilla Negra. El análisis se realiza en base a la variación porcentual de las rentabilidades simuladas anteriores (2006 – 2021) y la variación porcentual de la rentabilidad esperada (2023 – 2050) con respecto a la rentabilidad simulada anteriormente.

Una comparación del coeficiente de variación y el cambio porcentual determina si el cambio es pequeño, significativo o muy significativo.



Cambio no significativo ($X \in [-CV, CV]$)

Cambio significativo ($X \in [-2CV, -CV > U < CV, 2CV]$)

Cambio muy significativo ($X \in [-\infty, -2CV > U < 2CV, +\infty]$)

En donde:

CV: Es el coeficiente de variación porcentual de los rendimientos históricos y

X: Es la variación porcentual entre los rendimientos históricos y los rendimientos futuros.

“En estadística, cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable, se utiliza el coeficiente de variación. Su fórmula expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, mostrando una mejor interpretación porcentual del grado de variabilidad que la desviación típica o estándar. A mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor C.V., mayor homogeneidad en los valores de la variable” (Solanas, et al. 2005).

Ecuación 25. Coeficiente de variación.

$$CV = \frac{\sigma}{|X|} * 100$$

En donde:

σ : La Desviación estándar.

X: El promedio de los datos.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Caracterización climática de la zona en estudio

4.1.1.1. Comportamiento climático – meteorológico

El comportamiento de las condiciones climáticas en la zona de estudio en el período 2017 – 2020 muestran que las temperaturas máximas tienden a ir incrementándose año a año. Del mismo modo las temperaturas mínimas se van incrementando en el período de estudio. Las precipitaciones pluviales contrariamente tienen una tendencia decreciente (Anexo 2).

4.1.1.2. Calendario agrícola del cultivo

a) Fases del cultivo

En la Figura 28 se diferenciaron las etapas del cultivo a lo largo del periodo vegetativo con una duración de 175 días empezando con la siembra el 04 de noviembre del 2017 y concluyendo su periodo vegetativo con la cosecha, que fue el 07 de abril de 2018. En donde el comportamiento de desarrollo vegetativo, producción de flores y frutos se desarrollaron en condiciones climáticas similares a años anteriores con reducidas variaciones.

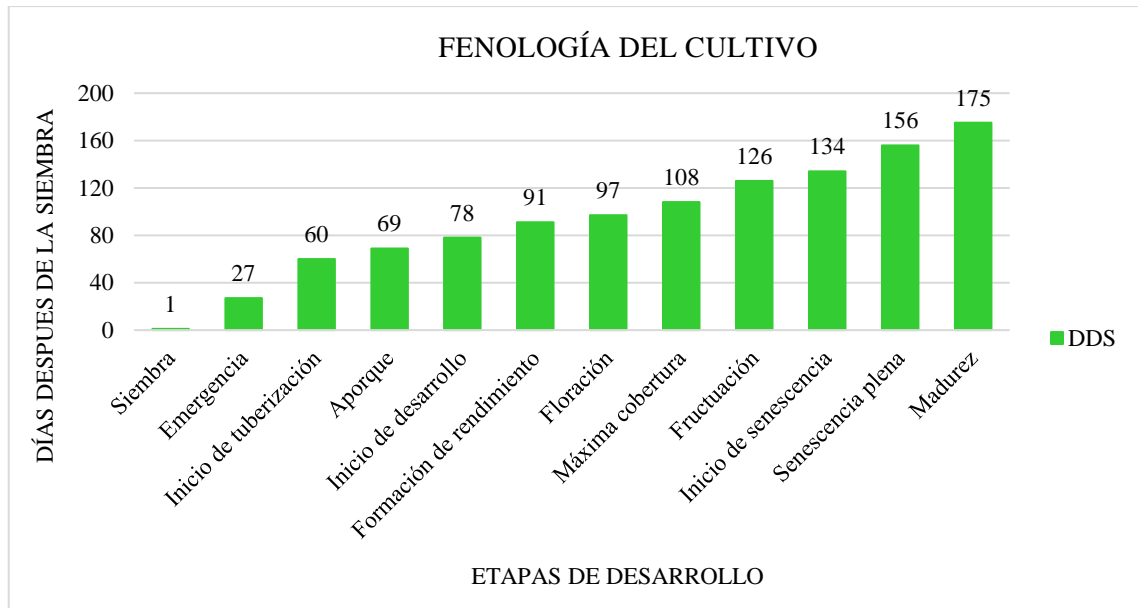


Figura 34.- Etapas del cultivo en periodo vegetativo.

Fuente: Elaboración propia.

b) Evaluación de la cobertura del dosel

En la Tabla 11 se observan los datos en porcentaje promedio de cobertura del dosel que fueron obtenidos de 19 fechas de muestreo con tres repeticiones por cada fecha, observándose que alcanzó mayores valores de cobertura del dosel a partir de los 80 días después de la siembra, se debe a que el suministro de hídrico de lluvia fue eficiente y no generó a la planta un estrés hídrico.



Tabla 11. Cobertura del dosel promedio de los 19 muestreos realizados con 3 repeticiones por muestreo, evaluados a 24 plantaciones.

Días de medición	Cobertura del dosel (%)
DDS	Lamina reducida
14	0
21	0.1
28	1.1
45	6
54	14.8
65	28.2
72	30.4
81	58.4
95	63.8
102	62.3
109	63.7
116	65.3
122	59.5
134	59.1
141	56.1
149	54.7
155	47.4
163	35.5

Fuente: Elaboración propia.

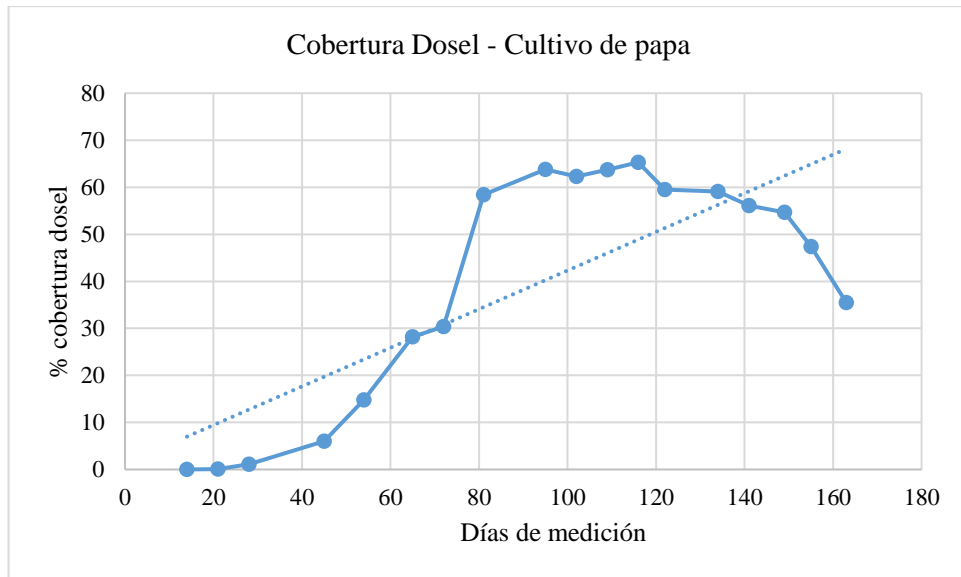


Figura 35. Cobertura Dosel del cultivo de papa en la campaña agrícola.

Fuente: Elaboración propia.

Conforme a la Figura 35 que la cobertura dosel decrece a los 105 días conforme a la lámina reducida y a los 117 días hasta la cosecha.

c) Evaluación de biomasa y profundidad de las raíces

En la Tabla 12 se visualiza que el cultivo con lámina reducida tiene regular Biomasa aérea seca, comparada con un cultivo con riego de lámina óptima de riego, comprobándose que el experimento con lámina reducida presentó señales de estrés hídrico. Con respecto a la profundidad de raíces, se observa que el experimento con lámina reducida de riego alcanza su mayor valor a los 116 DDS, el cual es tiene menor profundidad de raíces en comparación con una lámina óptima de riego.

Tabla 12. Longitud de raíz determinada en muestreos con tres repeticiones

Día de medición	Profundidad de raíces en (cm)		Biomasa aérea seca (Tn/ha)	
	Lamina óptima	Lamina de lluvia	Lamina óptima	Lamina de lluvia
45	11.9	14.4	-	-
54	21.65	21.15	-	-
65	39.65	35.15	3.69	3.6
72	44.15	37.65	-	-
81	37.55	39.55	-	-
102	40.3	39.8	-	-
116	36.55	40.55	8.78	8.5
134	38.25	34.55	-	-
175	-	-	12.49	12.1

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.1.3. Suelo

El suelo, luego de su evaluación resultó una textura Franco Arenosa (Suelo con capacidad convencional de retención de agua), capacidad de campo de 27.7%, un punto de marchitez permanente de 14.3% y densidad aparente de 1.7 g/cm³. Las características que requiere el modelo AquaCrop se encuentran a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Características de suelo de la campo experimental del estudio

Profundidad (cm)	Textura	Capacidad de campo (CC%)	Punto de marchitez (PMP%)	densidad aparente (g/cm ³)	Saturación (n%)	Conductividad hidráulica Ks(mm/día)
0- 30	Franco Arenoso	27.6	14.2	1.6	49	400
30 - 60	Franco Arenoso	27.6	14.2	1.6	42	400

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.2. Desempeño del modelo en el cultivo

4.1.2.1. Calibración y validación de los parámetros del modelo

En el proceso de evaluación del comportamiento del cultivo y su rendimiento en escenario de cambio climático con la metodología propuesta por la FAO AquaCrop en el cultivo de la papa en el distrito de Azángaro se tiene el periodo de calibración (04 de Noviembre del 2017 al 27 de abril de 2018) donde la parcela experimental tiene un Área total de 150 m² que corresponde a un total de 3 parcelas demostrativas, de las cuales cada parcela tiene un área de 50 m², donde el número de surcos por parcela es 8 y la longitud de surco es 10 m, con un Espaciamiento entre surcos de 0.35 m, así mismo tiene una Distancia entre plantas 0.40 m y el número de plantas por surco son 25. Para esta experimentación se tiene un adecuado ajuste de la curva del dosel (CC) que garantiza una buena aproximación en la estimación de la biomasa, rendimiento del cultivo, así mismo, es de particular interés tanto en el modelado de la transpiración de las plantas como en la evaporación del agua del suelo. Es por esto que la calibración y validación del modelo dependen de los parámetros que definen la curva del dosel (CC), como: CC0, CCx, CGC y CDC. Finalmente, se realizó la comparación de la curva del dosel, observada versus simulada (noviembre del 2017 a abril del 2018).

El resultado del proceso de calibración se visualiza en el Anexo 2, en él se observa que la lámina reducida mantuvo críticamente la humedad del suelo, a



excepción de los primeros 53 días del ciclo vegetativo, en la cual está ligeramente alejada a la capacidad de campo (FC); sin embargo, el cultivo no sufrió estrés hídrico. La expansión de la cobertura dosel no sufrió impedimentos debido a que el contenido de agua disponible en la zona radicular no logró superar su umbral superior Pupper (Línea verde) calibrado en 0.18, no se observó cierre de estomas ya que el contenido de agua en la zona radicular no supera su umbral superior Pupper (Línea roja) calibrado en 0.40 es por ello que la transpiración del cultivo (Tr) no tuvo mayores complicaciones, para finalizar no se generó senescencia temprana del dosel ya que el contenido de agua en la zona radicular no superó su umbral superior Pupper (Línea amarilla) calibrado en 0.50.

El resultado del proceso de validación se muestra en el Anexo 3, es muy similar al experimento con lámina óptima, la simulación nos muestra que se le debe aplicar 4 dosis de riego para que la lámina reducida (T1) mantenga la humedad del suelo cerca a la capacidad de campo (FC) hasta alcanzar los 53 DDS posteriormente este es regado por las precipitaciones quien mantiene húmeda las superficies de suelo. Además, se observa que no se supera los umbrales de estrés hídrico. La expansión de cobertura dosel no sufrió alteraciones, se puede observar un cierre estomático del 14% ya que el contenido hídrico de la zona de la raíz descendió superando su umbral superior Pupper (Línea roja) calibrado en 0.40 es por ello que la transpiración del cultivo (Tr) no tuvo mayores complicaciones, para finalizar no se generó senescencia temprana del dosel ya que el contenido de agua en la zona radicular no superó su umbral superior Pupper (Línea amarilla) calibrado en 0.50.

- Cobertura del dosel (CC)

Se empleó un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student para cuantificar el grado de dependencia que hay entre la media de las 24 muestras de cobertura del dosel registradas en 19 fechas para cada experimento y los valores simulados por el modelo, obteniéndose, como muestra la Tabla 15, grados de significación positiva en los dos experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson de 0.95 y 0.96 indicados en la Tabla 16. Lo que indica una asociación positiva entre las variables, lo que significa que se presenta una correlación positiva directa.

Los 54 datos de cobertura del dosel que fueron registrados durante el periodo vegetativo del cultivo en cada uno de los bloques experimentales, así como el gráfico de ajuste lineal entre lo simulado y los valores promedios observados al 95% de confianza se muestran en el Anexo 4.

Tabla 14. Prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores medios del dosel observado con la simulada.

Prueba estadística T - Student	Experimento L. Óptima		Experimento L. Lluvia	
	Simulado	Observado	Simulado	Observado
Media	47.11	44.37	39.16	39.24
Varianza	891.98	680.30	630.75	624.52
Observaciones	18.00	18.00	18.00	18.00
Coefficiente de correlación de Pearson		0.98		1.00
Diferencia hipotética de las medias		0.00		0.00
Grados de libertad		17.00		17.00
Estadístico t		1.62		-0.18
t Tabla ($\alpha=0.05$)		2.04		2.04
		Correlación positiva significativa		Correlación positiva significativa
		(Estadístico $t \leq t$ Tabla)		(Estadístico $t \leq t$ Tabla)

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Tabla 16 se observa los indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en AquaCrop 6.1, de los cuales se observa que el experimento sometido a condiciones de secano, obtiene indicadores estadísticos

más próximos a los valores óptimos en comparación al experimento sometido a condiciones de riego.

Tabla 15. Evaluación de eficiencia de la modelación del dosel: Calibración con lámina óptima (T_0) y validación con lámina reducida (T_1).

Experimento	r	NR	E	d
		MSE		
Calibración L. Óptima (T_0)	0.98	17.8	0.86	0.96
Validación L Lluvia (T_1)	1.00	26.9	0.72	0.95
optimo esperado	1	0	1	1

Fuente: Elaborado por el autor.

Para lámina de lluvia, se toma en consideración el nivel de precipitación requerida para un desarrollo vegetativo aceptable.

Se afirma que con un nivel de significancia al 5% en la prueba estadística t-Student, en la Tabla 19 y la Tabla 20, se tiene una correlación positiva significativa para ambos experimentos, el experimento de lámina de riego con un r Pearson de 0.98 es el alcanza mayor aproximación que más aproxima los valores simulados a los observados para la curva del dosel. Asimismo, los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) que presentan variaciones entre 0.72 a 0.86 consideran la simulación como “muy buena” a “excelente” según la tabla de Molnar (2011), y los valores de NRMSE que presentan variaciones entre 17.8 a 26.9 consideran la simulación como “buena” a “aceptable”, finalmente se puede concluir que la simulación indica de manera eficiente la variabilidad de los valores de cobertura del dosel observados.

Según a que el experimento a condiciones de riego por precipitación mostró indicadores estadísticos mucho más cercanos a los ideales, por tal fue usado para la calibración y validación espacial.

En la Figura 36 se visualiza el valor medio de los datos observados ajustados a los datos simulados de la cobertura del dosel (CC) para el experimento evaluado, manifestando la variación temporal a lo largo de todo el periodo del experimento (noviembre 2017 – abril 2018).

El periodo más crítico del desarrollo fenológico de la papa, fue para e inicio de la tuberización (55 – 65 DDS), ya que en este periodo el suelo debe mantenerse húmeda, por lo que un déficit de agua reduciría rotundamente el rendimiento provocando un estrés que afectaría a la fisiología de la planta. “La etapa de senescencia es menos sensible, en cuanto el déficit no sea tan severo y que acorte sustancialmente la duración del dosel verde. Por lo general, los déficits hídricos de la mitad y hacia el final del período de crecimiento suelen reducir el rendimiento menos que en la primera parte” (Steduto, et al. 2012).

En la Figura 36 se visualiza que en el experimento de lámina normal, no se da tendencias a la subestimación o sobrestimación a lo largo del período vegetativo del cultivo simulado, en cambio con el experimento de la lámina reducida (Figura 37) se da una ligera sobreestimación entre los 115 – 150 días después de la siembra, en esta sobreestimación que se da en la etapa de llenado del tubérculo, etapa en la cual fue reducida la lámina de riego, de esto se deduce que con la lámina reducida solo aseguro el 45% de los requerimientos hídricos en dicha etapa no fue la adecuada, lo cual generó estrés hídrico causando una ligera caída en la cobertura del dosel observada, el cual no es percibido por el modelo generando la sobreestimación.

Como se indicó anteriormente, en el experimento de lámina reducida (Figura 37) generó una sobreestimación del modelo para el periodo de llenado del tubérculo debido a que la lámina de riego aplicada (140 mm) no fue la suficiente para que se

lleve a cabo un desarrollo correcto en dicho periodo, generándose así, estrés hídrico por cierre de estomas (Ver simulación en el Anexo 4) lo que generó en total un promedio de reducción en el rendimiento del cultivo de 10%.

Lo que se observa en el gráfico la relación entre las curvas de simuladas para los experimentos regadas con una lámina normal y una lámina reducida, con las observaciones que se dio en el campo obtenidas de las parcelas regadas con lámina normal y reducida a lo largo del periodo vegetativo del cultivo (Figura 36 y Figura 37)

A continuación, los valores simulados por el modelo en línea curva, valores observados en campo agrupados: Experimento con Lámina reducida (Figura 36). El box plot representa el rango inter cuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, los bigotes de la caja, el valor máximo y mínimo registrado.

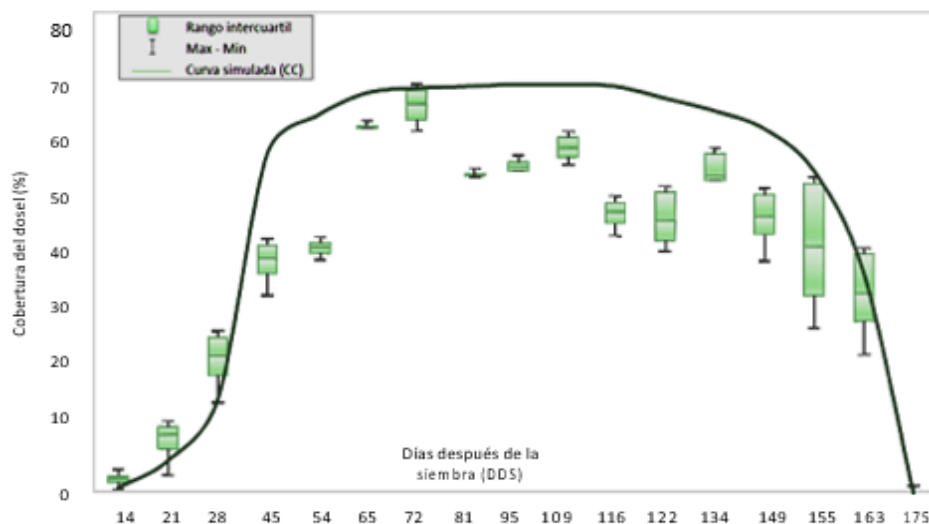


Figura 36. Curva simulada con lámina reducida pluvial.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.2.1.1. Biomasa aérea seca

La Tabla 20 muestra los indicadores estadísticos utilizados para evaluar la eficiencia del modelado de biomasa aérea seca en AquaCrop, en el cual se observa que el experimento obtiene indicadores estadísticos relativamente más próximos a los valores ideales.

Tabla 16. Evaluación de eficiencia de la modelación de biomasa seca aérea: Calibración con lámina óptima (T0) y Validación con lámina reducida (T1).

Calibración	r	NRMSE	E	d
Calibración L. Óptima (T ₀)	0.98	6.4	0.97	0.98
Validación L. de Lluvia (T ₁)	0.96	9.6	0.96	0.98
optimo esperado	1	0	1	1

Fuente: Elaborado por el autor.

Se puede decir que el valor del coeficiente de correlación de Pearson varía entre 0.96 y 0.98, lo que indica que existe una correlación positiva. Aunque el valor de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) varía de 0.96 a 0.97, ello según la tabla de Molnar (2011), se puede considerar la simulación como “excelente”, los valores de NRMSE que varían entre 6.4 a 9.6 consideran la simulación como “excelente” y los valores del índice de eficiencia de Willmott indican un buen ajuste, por lo que se concluye que la simulación explica de manera eficiente la variabilidad de los datos de biomasa aérea seca observados. La Figura 30 muestra el ajuste del valor promedio de los datos observados del experimento de evaluación con respecto a los datos simulados de biomasa aérea seca (BB), mostrando el cambio de tiempo durante todo el experimento.

A continuación, la Figura 38 se observa la curva de valores simulados por el modelo en línea roja y los valores observados en campo agrupados en “box plots” que

representa el rango inter cuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, el valor máximo y mínimo registrado con un total de 12 muestras por experimento.

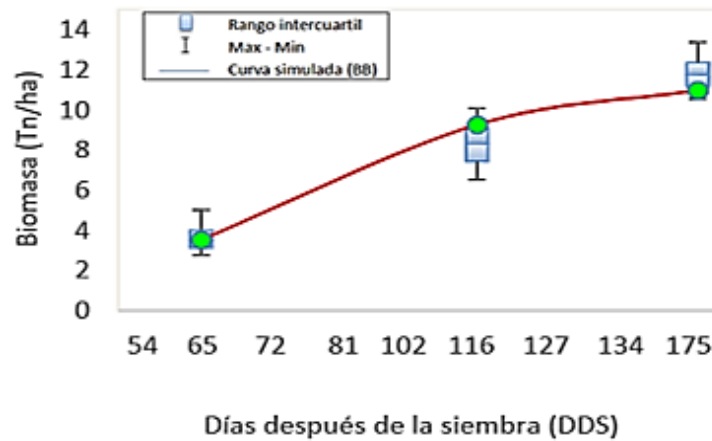


Figura 37. Variación temporal de la biomasa aérea seca (Ton/ha). experimento con lámina reducida.

Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 17. Comparación de biomasa aérea seca (Tn/ha) estimada en la cosecha (27 de abril de 2018) y la simulación por el modelo agrometeorológico AquaCrop en cada experimento.

Experimento	Parcela	Biomasa aérea seca (Tn/ha)			Diferencia	
		Observados	Promedio	Simulado	Absoluta	Porcentual
Calibración						
(L. óptima (To))	1T0	7.46				
		7.82	7.65	7.88	0.23	3.31
		7.66				
Validación (L. reducida (T1))	2T1	6.79				
		6.89				
	3T2	6.82	6.79	6.84	0.41	6.74
		6.81				
		6.82				
		6.60				

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Tabla 18, se observan los valores de biomasa aérea seca en Tn/ha recogidos del campo el día de la cosecha, así mismo los valores simulados por el modelo agrometeorológico AquaCrop, notándose una ligera subestimación para ambos

experimentos, sin embargo, los valores simulados difieren en el rango de 0.23 a 0.41 Tn/ha con los valores observados lo cual nos indica una buena estimación de la biomasa aérea por parte del modelo agrometeorológico AquaCrop, siendo el experimento de lámina óptima el que se asemeja más al observado en campo experimental.

4.1.2.1.2. Rendimiento

La Tabla 19 muestra los rendimientos en peso fresco de cada una de las tres parcelas experimentales que se obtuvo en campo el día de la cosecha (27 de abril de 2018), los resultados de rendimiento de acuerdo a cada parcela varían relativamente, sin embargo, esta diferencia es mínima, en seguida se procedió a realizar un promedio de rendimiento en unidades de toneladas por hectárea.

Tabla 18. Rendimiento promedio en peso fresco de la papa variedad Imilla Negra por cada experimento:

Experimento	Parcela	Rendimiento (Tn/ha)	Promedio
			Rendimiento (Tn/ha)
Lamina óptima	1T0	13.98	13.14
	2T1	12.3	
	3T2	12.2	

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 19.- Comparación del rendimiento al momento de la cosecha a peso seco (27 de abril de 2018) y el rendimiento simulado.

Experimento	Rendimiento (Tn/ha)		Diferencia	
	Observado	Simulado	Absoluta	Porcentual
Calibración (To)	6.482*	6.232	0.25	3.86
Optimo esperado			0	0

*Valor en peso seco

Fuente: Elaborado por el autor



En la Tabla 20 se observan los valores de rendimiento en peso seco obtenido en campo así mismo los rendimientos en peso seco simulados por el modelo, registrando una ligera sobreestimación, no obstante, el valor simulado varía en 0.25 Tn/ha con los valores observados lo cual muestra una buena estimación del rendimiento seco en Tn/ha por parte del modelo AquaCrop.

Tabla 20. Simulación de rendimientos en AquaCrop y rendimientos promedio anual observado de papa.

AÑOS	DRA (Azángaro) ¹	AquaCrop (Simulado) ³
2017	11.07	10.81
2018	11.44	11.70
2019	11.90	12.15
2020	12.30	12.35

Fuente: DRA (2017)¹, simulado²

En el presente experimento los resultados de rendimiento de cultivo de papa variedad Imilla Negra se tiene una diferencia de 0.20 T.M./há entre los años 2017 al año 2020, diferencia entre lo reportado por la Dirección Regional Agraria y lo simulado con AquaCrop.

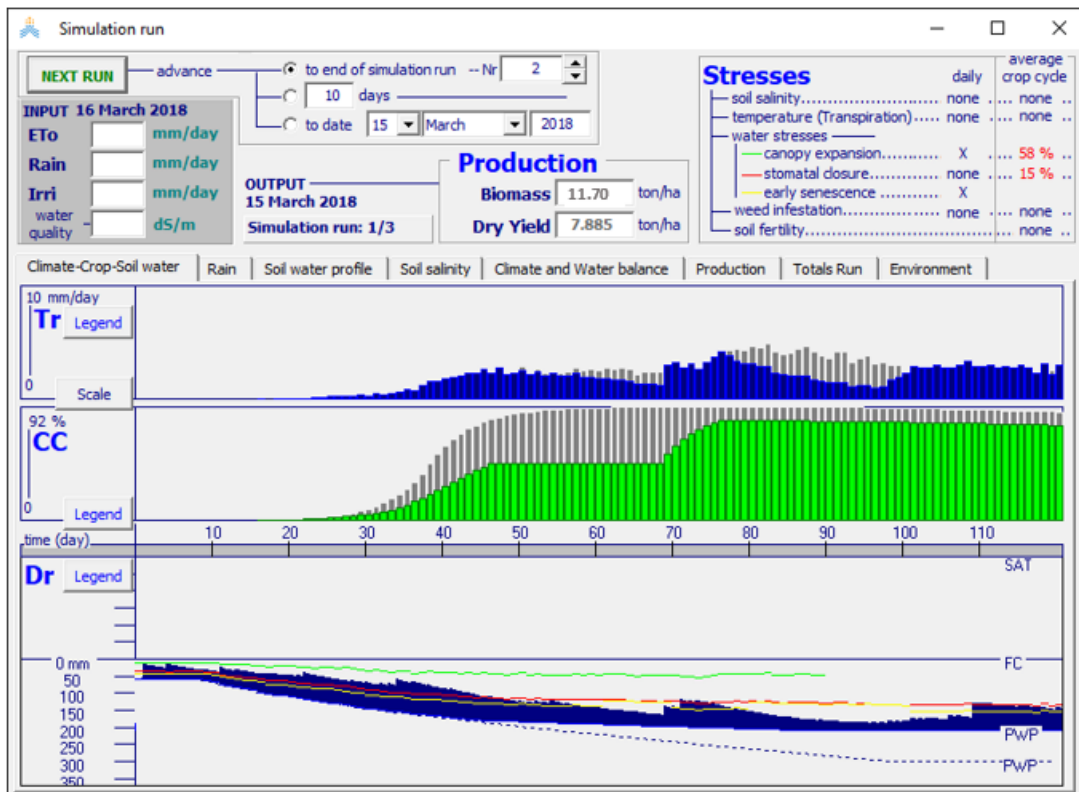


Figura 38. Simulación periodo año 2018.

Fuente: Elaborado en base de AquaCrop (FAO).

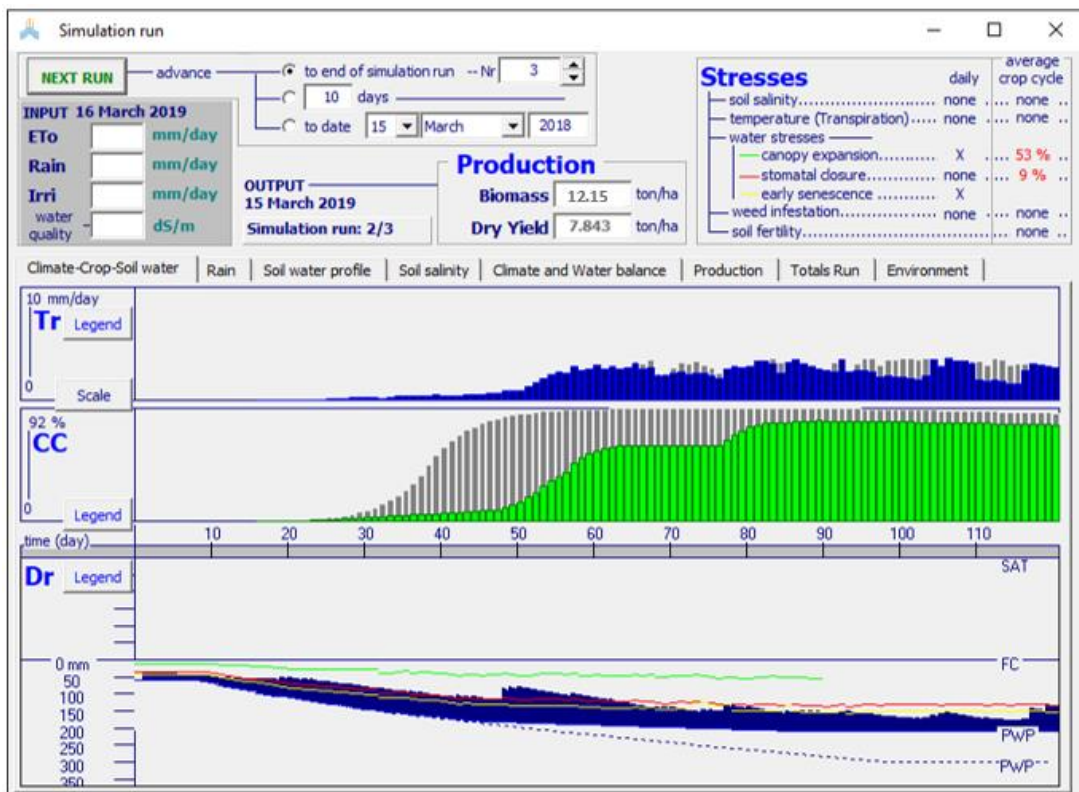


Figura 39. Simulación periodo año 2019.

Fuente: Elaborado en base de AquaCrop (FAO).

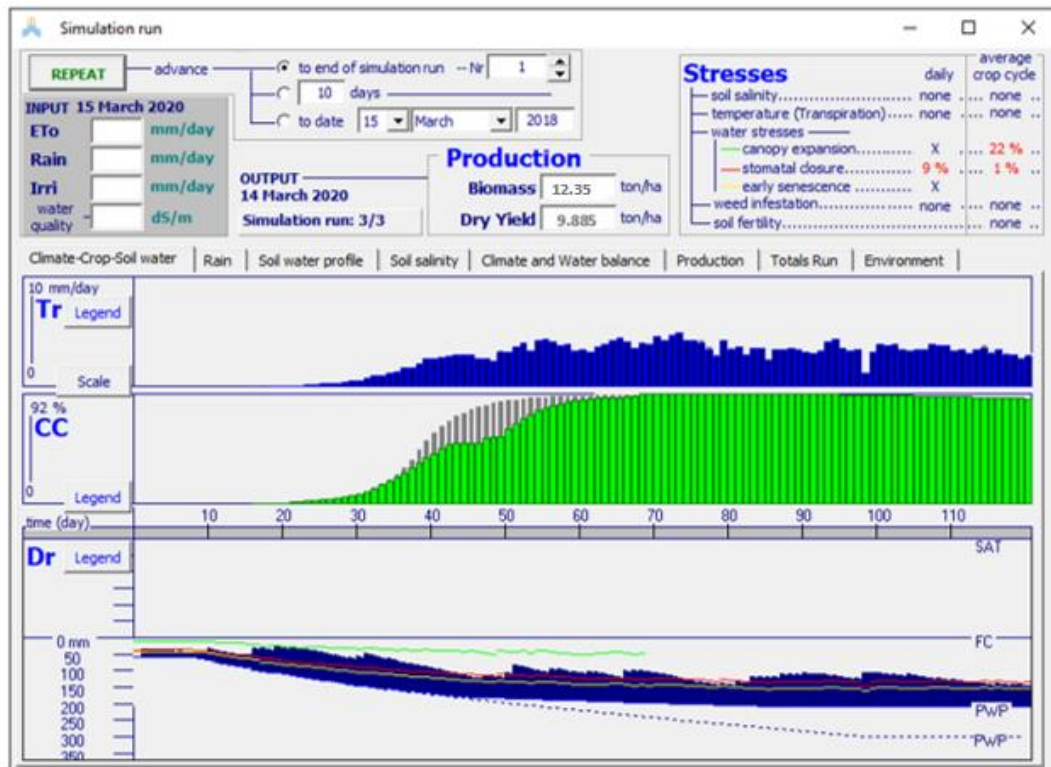


Figura 40. Simulación periodo año 2020.

Fuente: Elaborado en base de AquaCrop (FAO).

De la base de datos de la Dirección Regional Agraria (DRA), se tomaron los rendimientos promedio anual de producción de cultivo de papa en las variedades más comerciales para la provincia de Azángaro, las cuales se compararon con los rendimientos simulados para el periodo 2017–2020, de tal manera completar la validación. Para determinar los números de grado de dependencia de los valores de rendimiento estimados por el modelo y los valores de rendimiento obtenidos de la base de datos de la DRA para la temporada 2017–2020, se usó la prueba estadística t-Student (Tabla 21), para un nivel de significancia del 5%, se obtuvo así, una correlación positiva significativa para un coeficiente de correlación de Pearson de 0.85.

Tabla 21. Resultados de la prueba T-Student

Prueba estadística T – Student	Rendimiento Tn/ha (2005 – 2015)	
	Simulados	Rendimientos DRA (Azángaro)
Media muestral (X)	10.98	9.72
Varianza muestral (S2)	0.45	1.27
Observaciones	13	13
Dif. Hipotética de las medias		0
Grados de libertad		12
Estadístico t		4.61
t Tabla ($\alpha=0.05$)		1.81

Correlación positiva significativa
(Estadístico $t \leq t$ Tabla)

Fuente: Elaborado en base al software estadístico SPSS

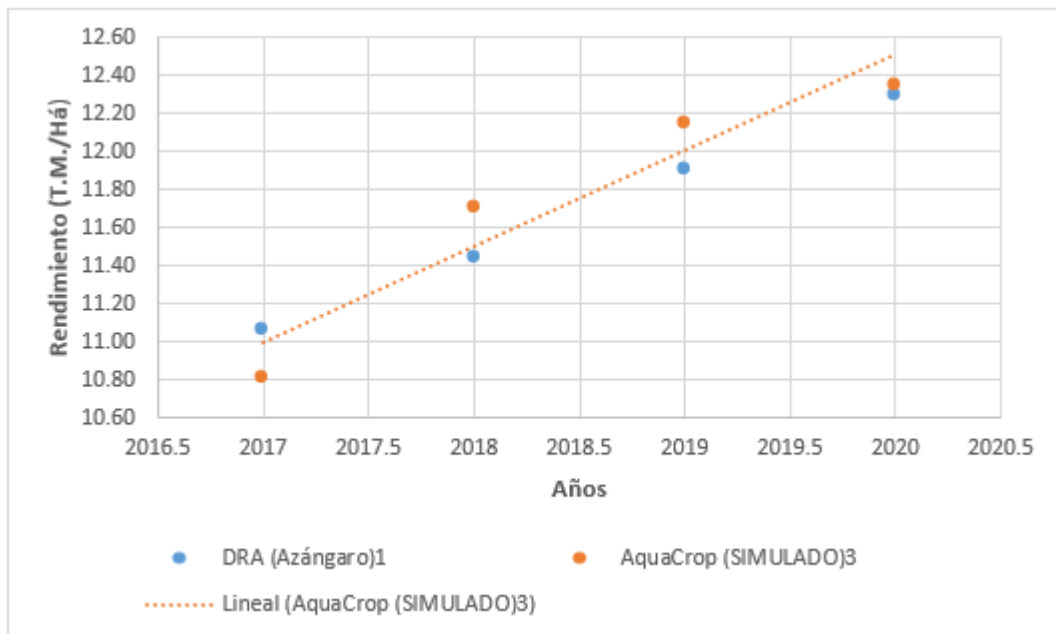


Figura 41.- Rendimientos obtenidos 2017-2020.

Fuente: Elaborado por el autor

Los rendimientos de producción conforme a la DRA para el período 2017 – 2020, está representado por el (punto celeste) en T.M./há, y los rendimientos simulados por AquaCrop (2017 – 2020) (puntos naranjas), y la línea discontinua naranja muestra la tendencia simulada para la calibración y validación del Modelo AquaCrop.

En la presente investigación, en el reporte de la Dirección Regional Agraria de Azángaro – Puno, muestra rendimientos en campo de 11.07 Tn/ha y 12.30 Tn/ha. Ahora, los rendimientos simulados se encuentran entre 10.81 Tn/ha y 12.35 Tn/ha, en los experimentos lámina de lluvia(reducid) y lámina óptima respectivamente, los cuales son rendimientos similares a los reportados por la Dirección Regional Agraria de Azángaro – Puno.

4.1.2.1.3. Clima

a. Periodo de ajuste del 15 de noviembre del 2017 al 15 de marzo del 2018

De acuerdo a los niveles de precipitación tomados de los datos del SENAMHI, estación meteorológica Azángaro tenemos que en la Figura 42, se tiene los registros de temperatura (°C) T° máx., T° mín. y T° media, las cuales alcanzaron valores de hasta 21.8 °C para temperatura máxima, un valor de temperatura media de 11.03 °C, y una temperatura mínima que alcanzó el -2.2 °C a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo.

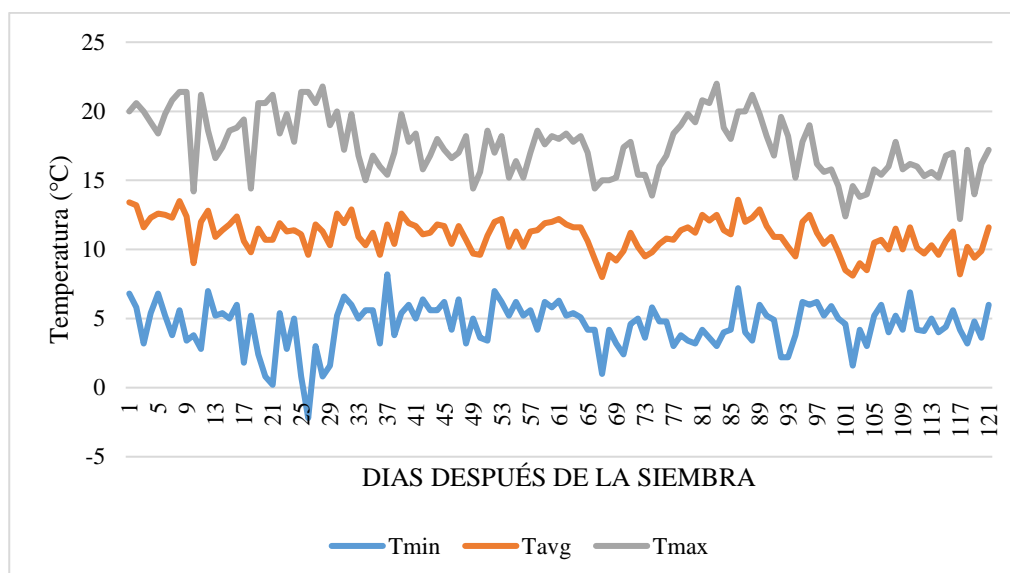


Figura 42. Temperatura máxima, media y mínima, sobre días después de la siembra.

Fuente: Elaborado con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

Ahora, en el eje secundario de la Figura 43 se presenta los valores de precipitación pluvial (mm), en el mes de enero se tuvo una precipitación de 27.9 mm.

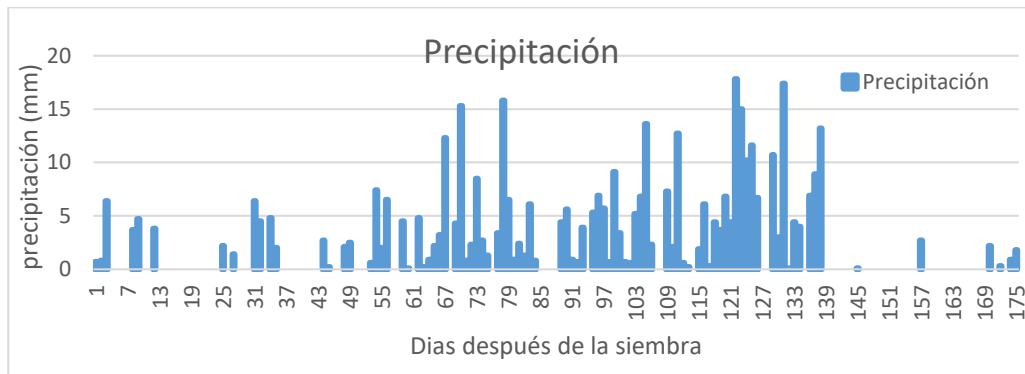


Figura 43. Precipitación pluvial en milímetros sobre días después de la siembra.

Fuente: Elaborado con información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

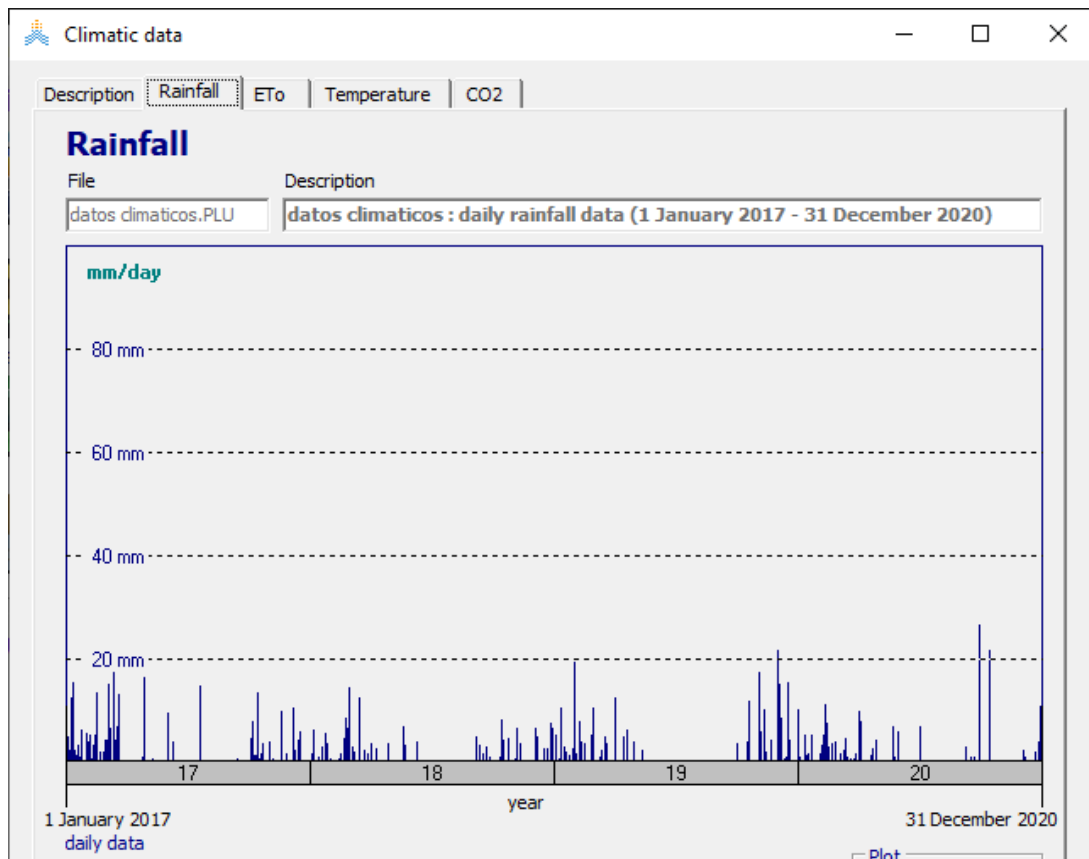


Figura 44. Precipitaciones pluviales en el período enero 2017 a diciembre del 2020.

Fuente: Elaborado con AquaCrop e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Figura 45 tenemos la serie de lluvias desarrolladas en el período de enero del 2017 a diciembre del año 2020, donde se tienen precipitaciones de hasta 28.9mm en el año 2020, datos obtenidos por medio de AquaCrop.

4.1.2.1.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia en el período de enero del 2017 a diciembre del año 2020, muestra un comportamiento cíclico, teniendo un promedio de 2mm y picos máximos de 5.8mm.

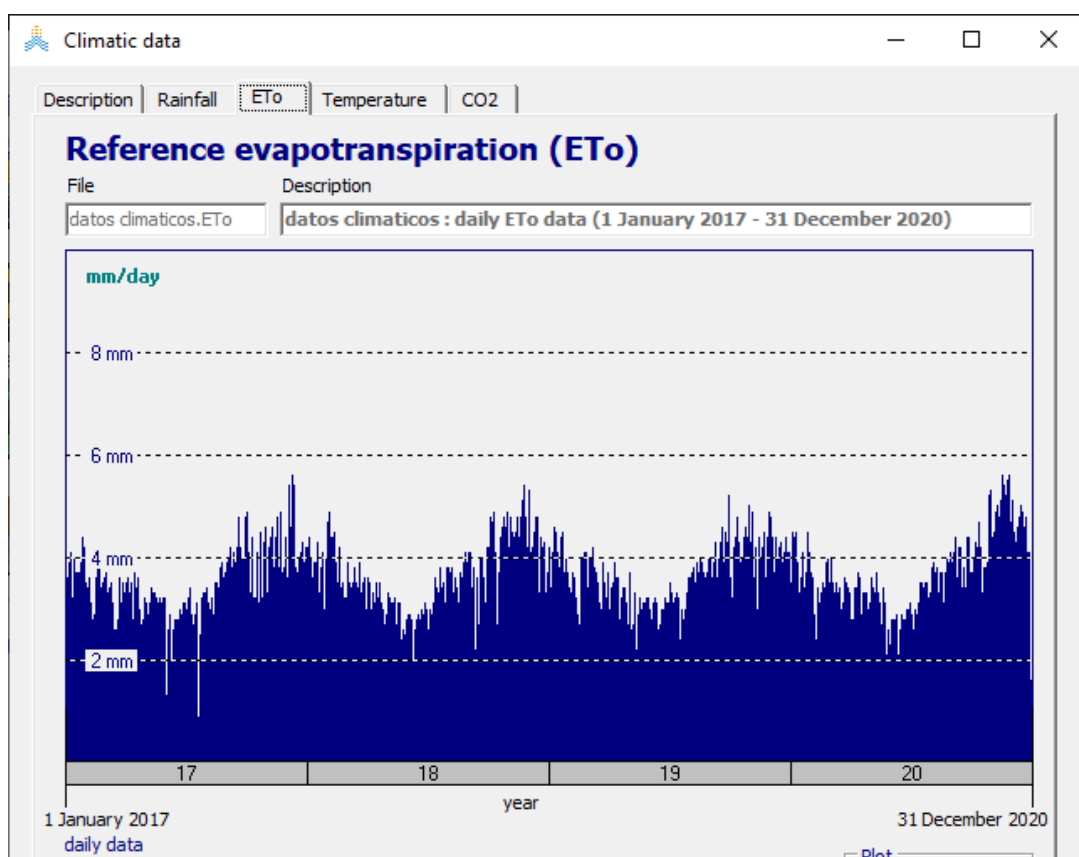


Figura 45. Evapotranspiración de referencia (Eto).

Fuente: Elaborado con AquaCrop e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

Los valores relacionados con el balance de agua en el suelo, en donde vemos que los valores estacionales de evapotranspiración de referencia, en este caso 490.3, precipitación solo 356.5 milímetros, no se aplica riego por ser por secano.

Para el 15 de marzo, sería la evapotranspiración desde el suelo máxima (0.5) y la transpiración (3.0).

La evaporación de todo el suelo es de 158.2 y de transpiración de 207.4.

Los valores estacionales de escorrentía superficial son de 16.4, de agua infiltrada 340.1, drenaje 0. El ascenso de agua (Capillary rise) desde la capa freática ha sido de cero (Figura 47).

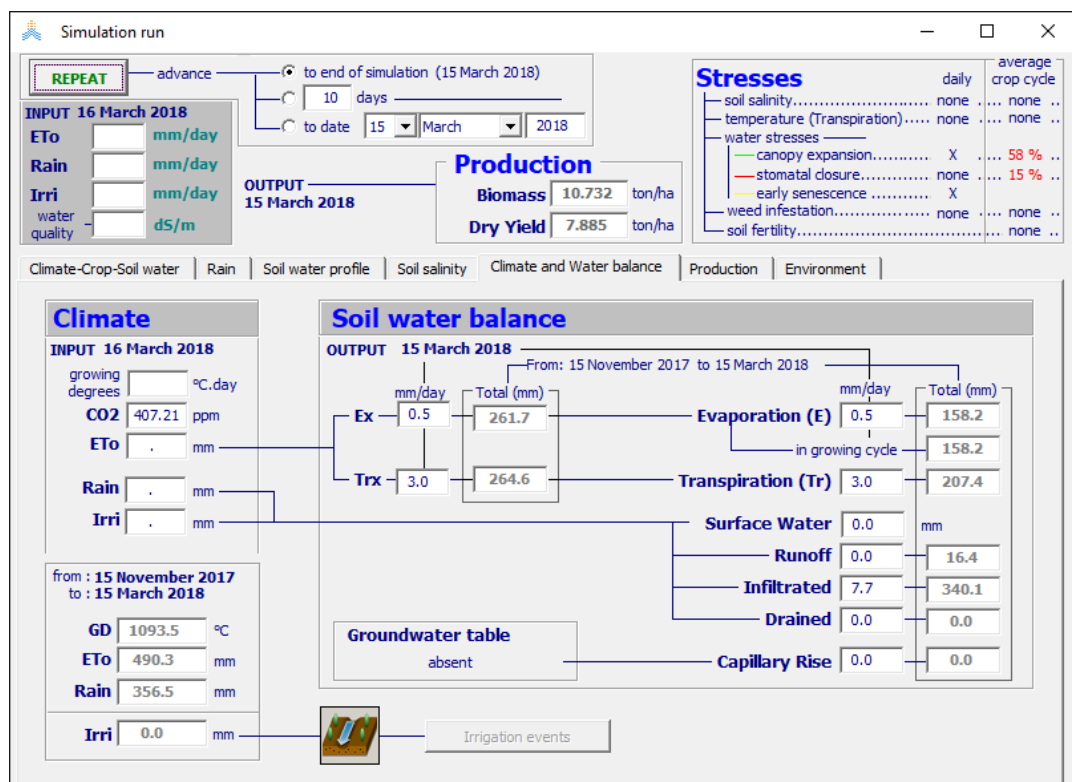


Figura 46. Balance de agua en el suelo.

Fuente: Elaborado con AquaCrop e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

4.1.2.1.5. Temperatura del aire

De acuerdo a los datos climáticos de temperatura diaria en el periodo enero 2017 a diciembre del 2020, se obtiene los parámetros de temperatura máxima y mínima, donde en la Figura 48 se muestra temperaturas mínimas del aire de hasta -7 °C y temperaturas máximas del aire mayores a los 22 °C.

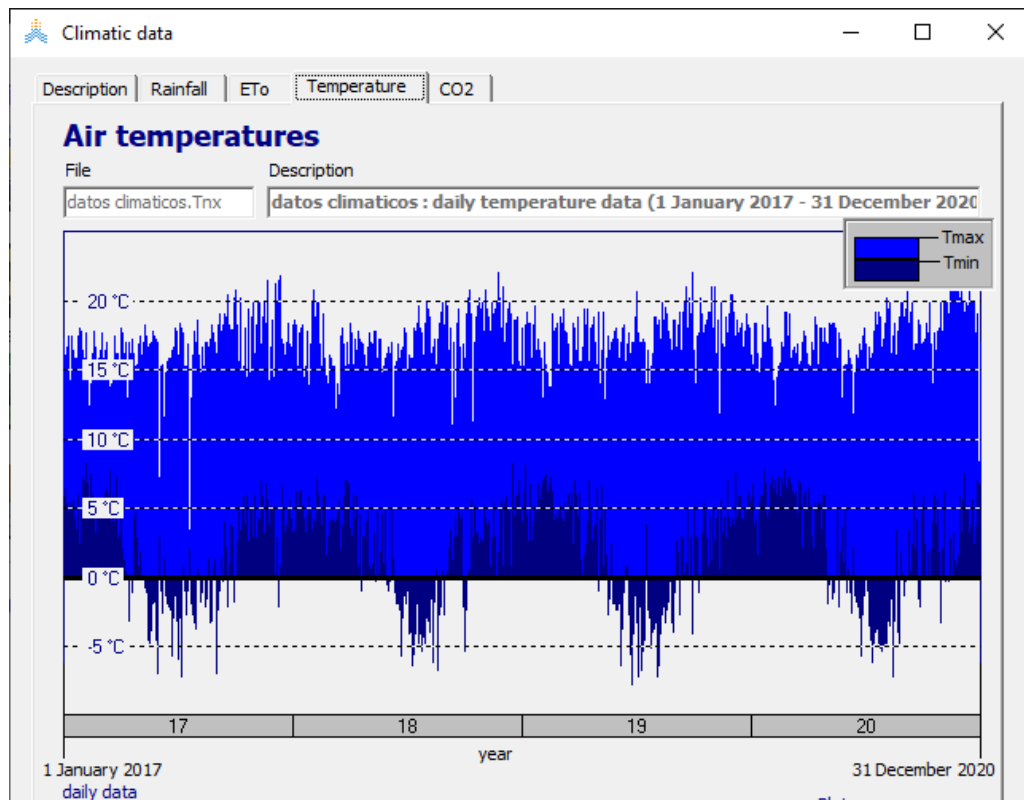


Figura 47. Temperatura del aire (enero 2017 a diciembre 2020).

Fuente: Elaborado con AquaCrop e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

4.1.2.1.6. Concentración de CO₂ atmosférico

Los niveles de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera del medio en estudio, se muestran en la Figura 49 en donde la concentración de referencia es de 369.41 ppm, teniendo concentraciones máximas de hasta 421 ppm. Concentraciones de tendencia creciente, donde se muestra la evolución en el periodo 1902 al 2099.

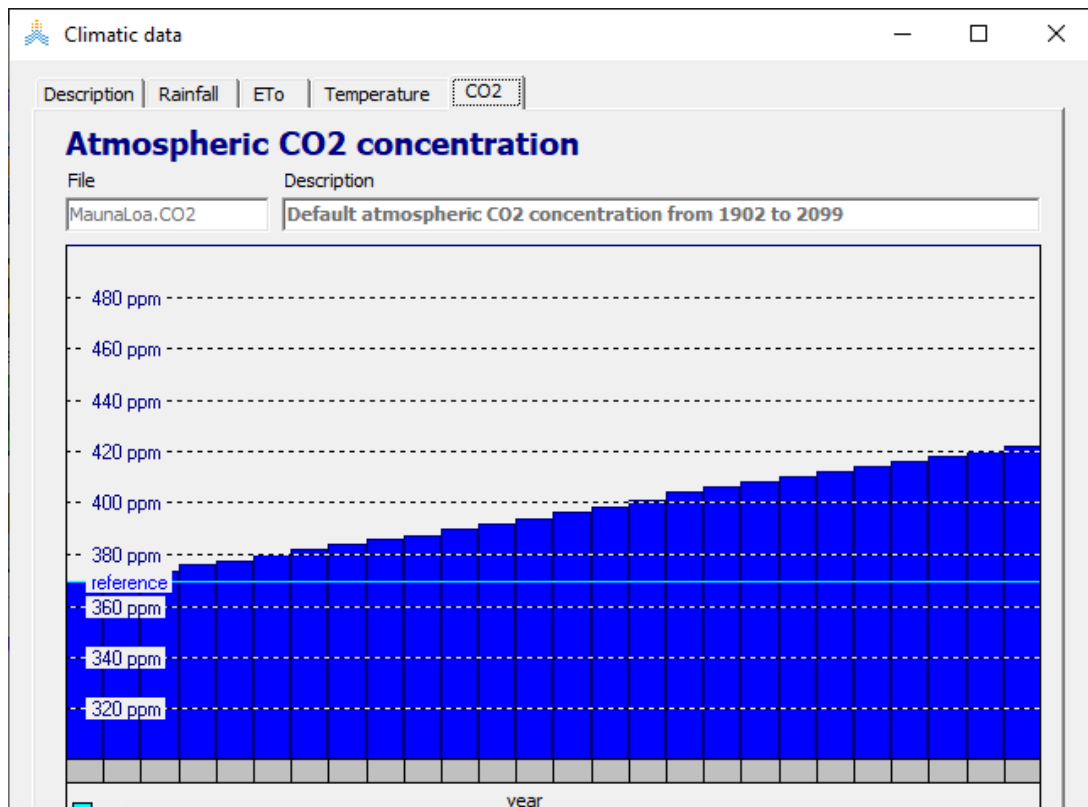


Figura 48. Concentración de CO₂ en la atmósfera, en la zona en estudio

Fuente: Elaborado con AquaCrop e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

a. Evapotranspiración, método FAO

Para el desarrollo de la obtención de la evapotranspiración (ETo), se desarrollan con los datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones pluviales, aplicando el software ETo Calculator de la FAO, que hace los cálculos haciendo uso de las ecuaciones matemáticas de Penman – Monteith.

Update Station characteristics menu

File EtoAzangaro1 DSC

Station description

Station Azangaro

Country Perú

Location Degrees and Minutes
 Decimal degrees

Latitude 14 degrees 55 minutes South

Longitude 70 degrees 11 minutes West

Altitude 3857 meter above sea level

Location

at the coast
 interior location

in arid or semi-arid area
 in semi-humid or humid area

light winds in area
 light to moderate winds in area
 moderate to strong winds in area

Figura 49. Descripción de la estación meteorológica de Azángaro.

Fuente: Elaborado con el software ETo calculator e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Figura 51, podemos determinar que la evapotranspiración del cultivo de referencia para el año 2017 es de 2.5 mm/día en promedio teniendo picos de evapotranspiración máxima entre el mes de noviembre y diciembre con niveles de 5.8 mm/día.

En la Figura 52, podemos determinar que la evapotranspiración del cultivo de referencia para el año 2018 es de 2 mm/día en promedio teniendo picos de evapotranspiración máxima entre el mes de noviembre, diciembre y febrero con niveles de 5.5 mm/día.

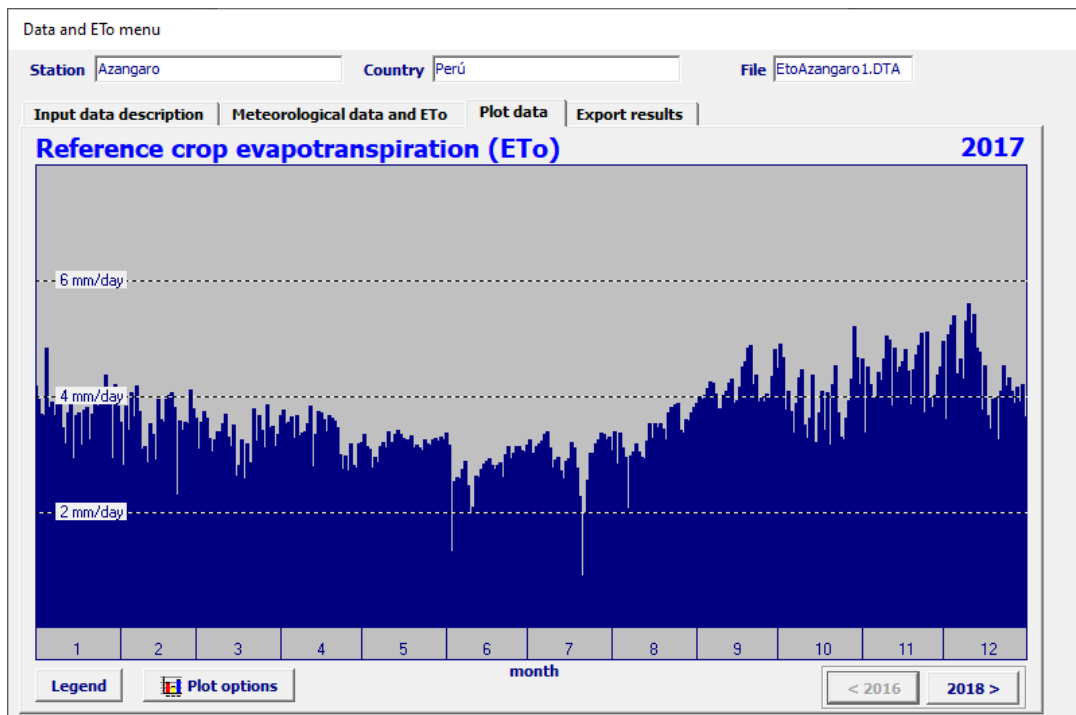


Figura 50. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2017.

Fuente: Elaborado con el software ETo calculator e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

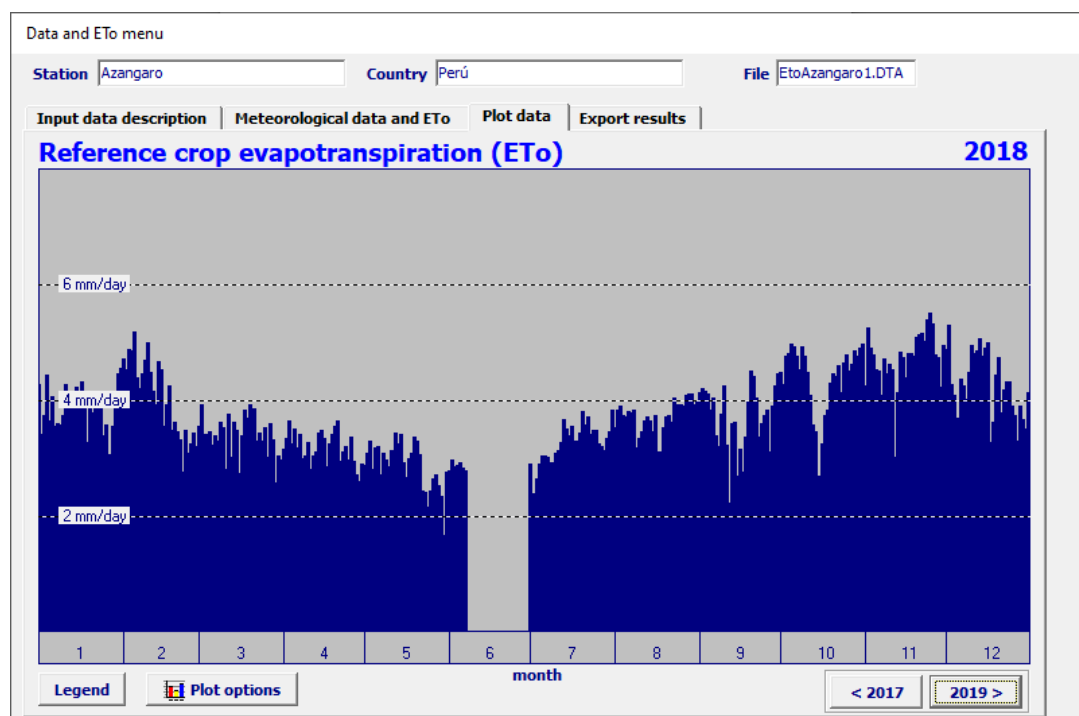


Figura 51. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2018.

Fuente: Elaborado con el software ETo calculator e información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Figura 53, podemos determinar que la evapotranspiración del cultivo de referencia para el año 2019 es de 2.1 mm/día en promedio teniendo picos de evapotranspiración máxima entre el mes de setiembre, octubre, noviembre y enero con niveles de 5.6 mm/día.

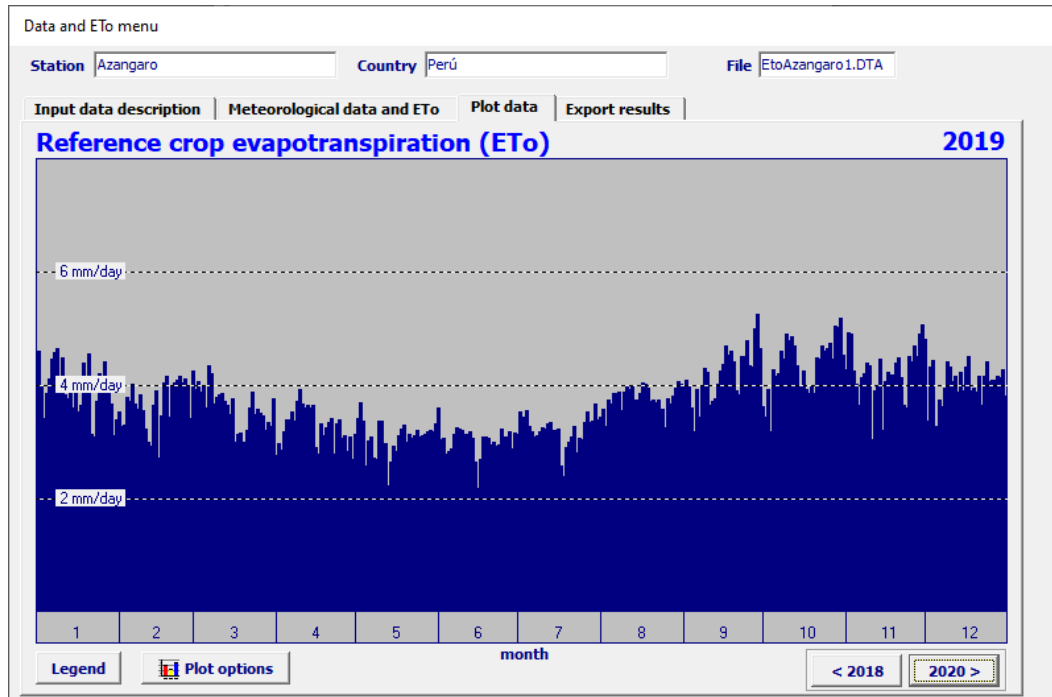


Figura 52. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2019.

Fuente: Elaborado con el software ETo calculator e información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Figura 54, podemos determinar que la evapotranspiración del cultivo de referencia para el año 2020 es de 2.3 mm/día en promedio teniendo picos de evapotranspiración máxima entre el mes de noviembre y con niveles de 5.8 mm/día.

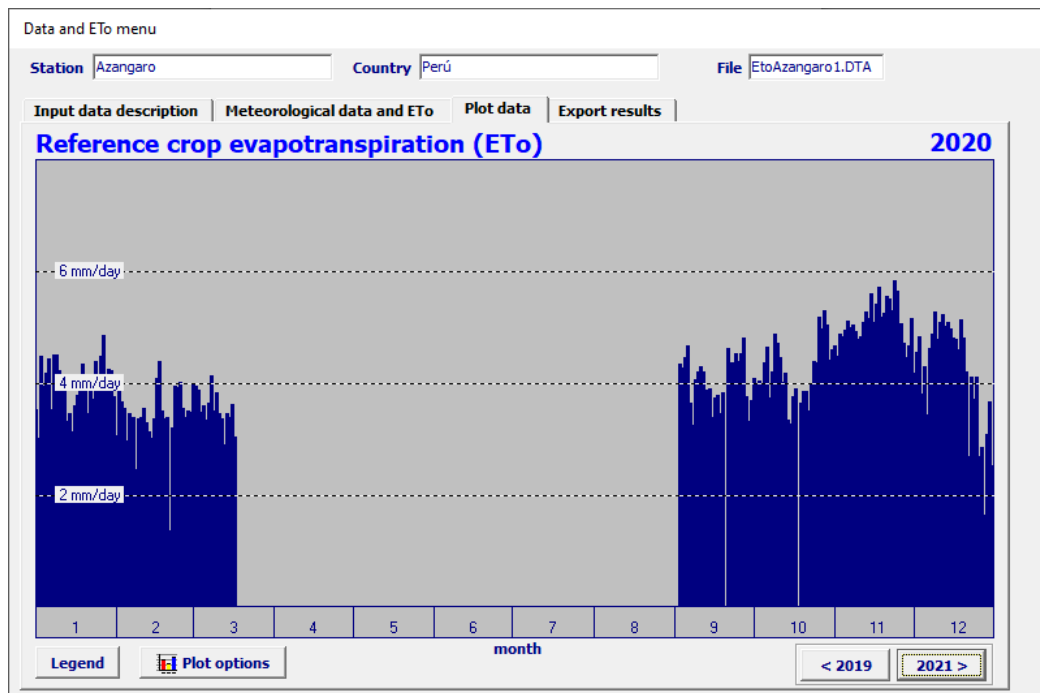


Figura 53. Evapotranspiración del cultivo de papa del año 2020.

Fuente: Elaborado con el software ETo calculator e información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

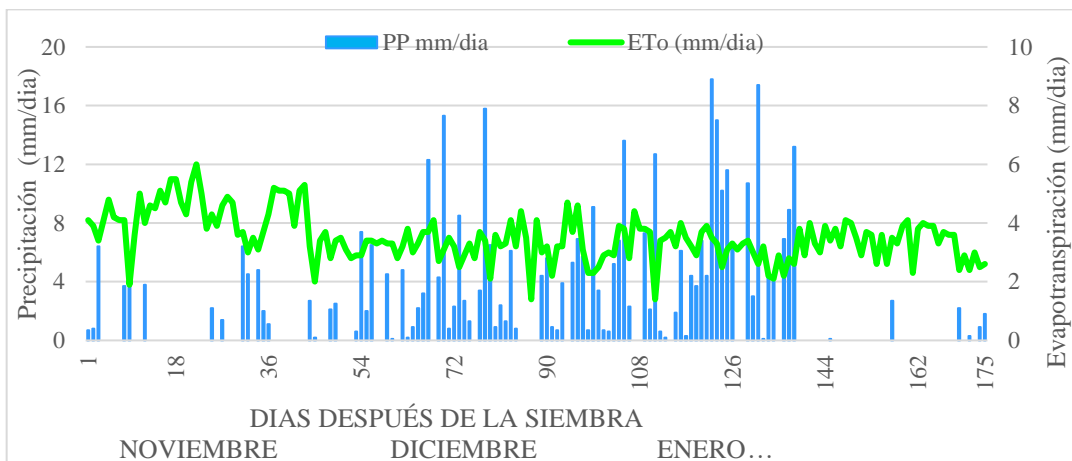


Figura 54. Barras de precipitación pluvial y evapotranspiración durante el periodo vegetativo de cultivo.

Fuente: Elaborado con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

De acuerdo a los resultados de las barras de precipitación pluvial y evapotranspiración durante el periodo vegetativo de cultivo se tiene un promedio ligeramente elevado de 5.7 mm/día para los meses de noviembre y diciembre, y un promedio somero que bordea los 3.3 mm/día que va desde enero hasta la fecha de cosecha (Figura 56).

Por último, se tienen los valores porcentuales de Humedad Relativa (HR%) y Radiación solar, en el eje principal de la Figura 42 se grafican las líneas (azul) que representan la HR%, estos valores tienen un promedio de 67.47% para todo el periodo vegetativo, por otro lado, en el eje secundario se tiene las líneas de calores de radiación solar, la cual se calculó mediante las ecuaciones antes mencionadas; los valores que mantiene a lo largo del periodo no supera los 31.57 MJ/m²/día.

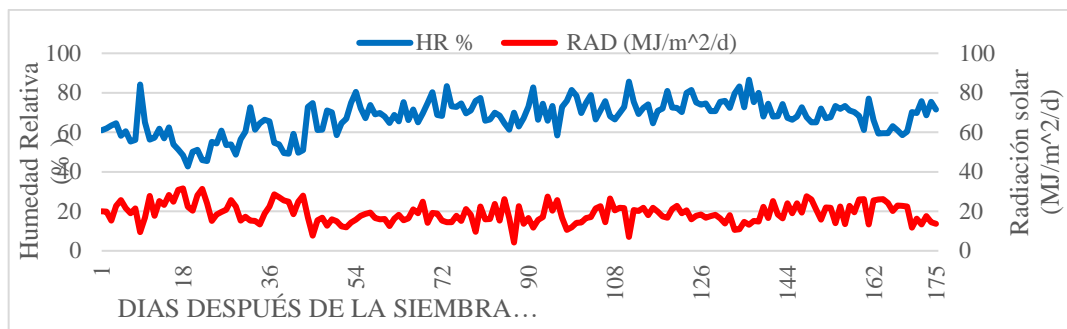


Figura 55. Humedad relativa y radiación solar extraterrestre.

Fuente: Elaborado con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Tabla 22, se presentan los resultados de la correlación lineal entre la evapotranspiración calculada por la ecuación Penman – Monteith y la evapotranspiración obtenida por la ecuación de Hargreaves con un coeficiente empírico ajustado para condiciones de Azángaro ($C = 0.00204$), se obtuvo un error cuadrático medio de 0.224 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.95.

Tabla 22. Indicadores estadísticos del ajuste de la evapotranspiración, ecuación Hargreaves en función a Penman – Monteith para condiciones de Azángaro.

Estación Azángaro					
Norte(m)	Este(m)	Altitud(m)	Error Medio	Ajuste R	Constante (C)
145451.7	701126.7	3863	-0.00011	0.95	0.00204

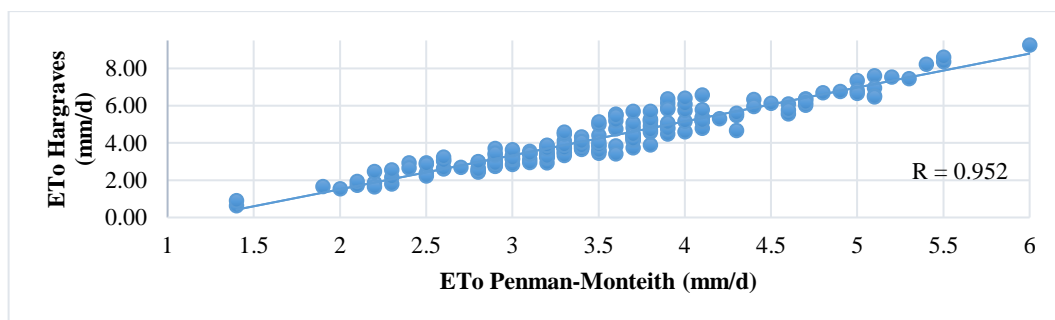


Figura 56. Correlación lineal de la evapotranspiración estimada por Hargreaves y Penman – Monteith para condiciones de Azángaro.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.3. proyección y evaluación del efecto del cambio climático en el rendimiento de la papa para el periodo 2023 – 2050.

Para iniciar se determinó el efecto del cambio climático en proyecciones de precipitación (PP), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) desde 2023 a diciembre de 2050, este análisis se desarrolló en función a coeficiente de cambio porcentual de la información climática histórica (1975 – 2005), por lo cual se determinó si la variación de valor proyectado era “Muy significativo”, “Significativo” o “No significativo”. Una vez finalizado el análisis se proyectó la evapotranspiración y rendimientos de cultivo a partir de datos proyectados de temperaturas y precipitaciones se determinó el efecto del cambio climático en las proyecciones del rendimiento de cultivo de papa variedad Imilla Negra y logró determinar el impacto

del cambio climático con base en el coeficiente de variación porcentual de la producción (rendimiento de cultivos) histórica simulada.

4.1.3.1. Efecto del cambio climático en la información climática futura

a) Análisis de la Precipitación

En la Figura 57, se visualiza el comportamiento de la precipitación acumulada promedio mensual para el periodo 2023 – 2050 de los modelos de circulación bajo la ruta representativa de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5, y la precipitación histórica que presenta el periodo 2006 – 2021, así mismo, en la figura se presenta el promedio de los valores proyectados para todos los escenarios.

Para la ruta de concentración RCP 4.5, el modelo CANESM2 estima mayores precipitaciones en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, lo cual, se podría asumir que el modelo CANESM2 sería el más favorable para la producción del cultivo en estudio, debido a que alcanza valores de precipitación más altos en la campaña agrícola, por lo contrario, el modelo HADGEM2-ES, sugiere incrementos de lluvia solamente en los meses de agosto a noviembre, dejando los demás meses muy por debajo de los otros modelos, por su parte el modelo MIROC 5 nos presenta una reducción sustancial en todos los meses del año respecto a los registros históricos.

Para la ruta de concentración RCP 8.5 el modelo CANESM2, similar que en la RCP 4.5, sugiere incrementos en sus niveles de precipitación a inicios y finales de año, sin embargo, predice cierta estabilidad respecto a la histórica observada en los meses de febrero a abril, y en octubre, noviembre, diciembre y enero superan valores respecto a la histórica observada en por lo menos 10 mm, el modelo HADGEM2-ES estima disminuciones bastante considerables a inicios de año excepto en los meses de junio a octubre, pero estos valores no influirán en nuestra campaña agrícola;

finalmente el modelo MIROC 5, al igual que el RCP 4.5 considera reducciones de precipitación en todo el año.

En general, el promedio de los valores proyectados sugiere disminuciones desde diciembre a abril respecto a los valores promedios históricos observados. Se podría deducir que el modelo CANESM2 se comporta como modelo optimista en las dos rutas proyectadas (RCP 4.5 y 8.5) debido a que sus valores favorecen en los meses de campaña agrícola.

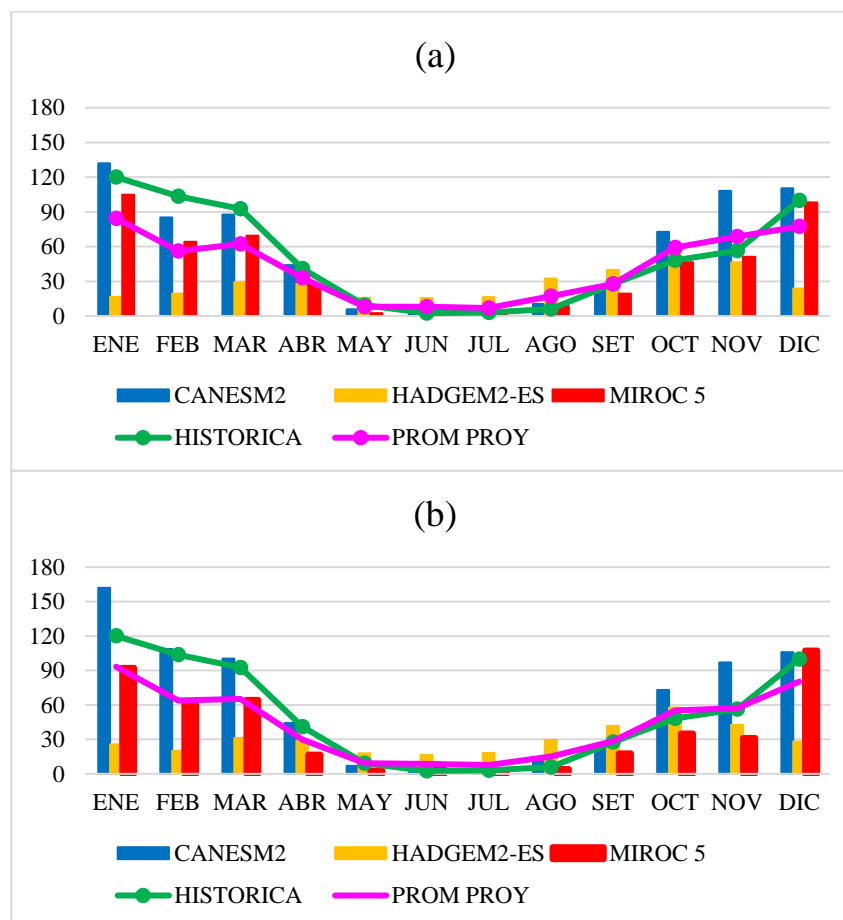


Figura 57. Promedios de precipitación 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

A continuación, en la Tabla 23 se visualiza el análisis de variación de la precipitación proyectada en base a la precipitación histórica, para la ruta de concentración RCP 4.5 se observa que los modelos CANESM2 y HADGEM2-ES sugieren por lo general mayor cantidad de valores positivos en meses de campaña, podríamos considerarlos como modelos optimistas en niveles de precipitación para la RCP 4.5; sin embargo, no sucede lo mismo con el modelo MIROCO 5, este sugiere datos negativos; es decir, comúnmente disminuye los niveles de precipitación en todo el año en las dos rutas de concentración (RCP 4.5 y RCP 8.5), de manera análoga para la RCP 8.5, el modelo CANESM2 sugiere datos positivos a lo largo del año, lo que no sucede con el modelo HADGEM2-ES, que predice tanto valores negativos y positivos.

Podemos deducir que el modelo que sugiere mejor los valores de incrementos de precipitación en ambas rutas de concentración es el CANESM2; por lo contrario, el modelo MIROC 5 es el que mejor representa las disminuciones de lluvia en ambas rutas, dejando al modelo HADGEM2-ES, como la intermedia entre ambas.

Tabla 23. Precipitación estimada media mensual (2023 - 2050) y variación respecto a la media histórica mensual (1975 al 2005) en la estación Azángaro.

Meses	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANES M2	HADGEM2-ES	MIRO C 5	CANES M2	HADGEM2-ES	MIRO C 5
ENE	11.96	11.96	-15.22	42.06	-94.42	-27.90
FEB	-18.49	-18.49	-39.40	5.08	-83.45	-40.50
MAR	-5.11	-5.11	-23.24	7.78	-61.57	-28.43
ABR	2.92	2.92	-13.72	3.19	-12.11	-24.37
MAY	-3.38	-3.38	-6.86	-2.32	8.63	-6.50
JUN	1.92	1.92	1.51	2.87	14.01	1.69
JUL	-0.96	-0.96	-0.61	-0.70	15.07	-0.48
AGO	4.60	4.60	2.65	5.34	23.50	-1.85
SET	-3.79	-3.79	-8.39	-1.78	14.02	-9.92
OCT	24.62	24.62	-1.63	24.79	9.62	-13.01
NOV	51.61	51.61	-5.38	40.72	-13.67	-25.31
DIC	10.68	10.68	-1.64	6.12	-71.73	7.49

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.



En la Figura 58 se visualiza la distribución de la precipitación total anual para el periodo histórico (2006 – 2021) y periodo proyectado (2023 – 2050). El modelo CANESM2 en las dos rutas (RCP 4.5 y RCP 8.5), de acuerdo al gráfico es la que se representa como la más optimista, el modelo se mantiene relativamente estable por encima de la histórica por 100 mm a lo largo de las proyecciones; los picos más altos los presenta el escenario RCP 8.5 CANESM2 en los años 2023 y 2036 superando los 900 mm anuales; por lo contrario, el escenario RCP 4.5 CANESM2 presenta reducciones para el año 2048 en donde solo alcanza los 350 mm en todo el año.

El modelo HADGEM2-ES en las dos rutas (RCP 4.5 y RCP 8.5) se comporta relativamente estable, sin embargo, sus picos más altos no superan los 500 mm anuales, esto se puede notar en los años 2026, 2028, 2032, 2035 y 2049, se podría inferir que estos escenarios sugieren los gráficos más pesimistas respecto de las demás.

Finalmente se tiene las rutas del modelo MIRCO5, los gráficos de este modelo son muy inestables presentando valores muy alejados de entre sus picos altos y bajos; en este entender los valores más altos los sugiere el escenario RCP 4.5 MIRCO5 que supera los 800 mm anuales en el año 2032, 2042 y con valores ascendentes en el 2050; así mismo sus datos más bajos se presentan para el año 2034 y 2048 alcanzando valores de 150 mm y 100 mm respectivamente.

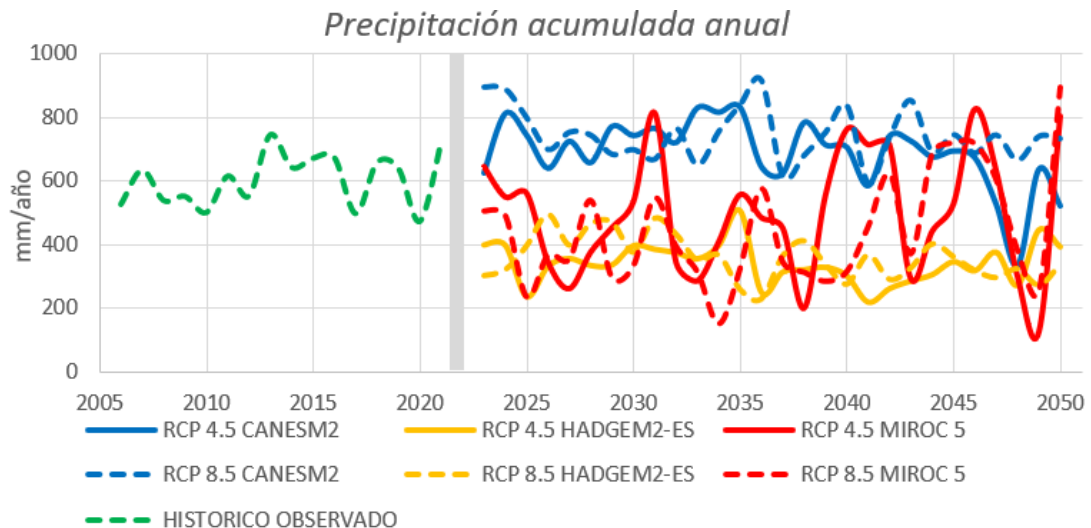


Figura 58. Precipitación acumulada anual para el periodo 2023-2050 para 6 modelos de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

Según la estimación de la precipitación anual histórica del periodo 2006-2021. Las líneas en el margen derecho corresponden a los escenarios de los modelos en las RCP 4.5 y 8.5, la línea continua del margen izquierdo representa a las precipitaciones históricas observadas. La franja ploma vertical marca el fin entre el gráfico de la precipitación histórica observada y el inicio de las proyecciones.

b) Análisis de la temperatura máxima

En la Figura 59, se observa el diagrama de barras que explica cómo actúa la temperatura máxima mensual promedio de los modelos de circulación general bajo las rutas representativas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 para el periodo 2023-2050, y la temperatura máxima mensual del periodo histórico 2006 – 2021, notándose que las temperaturas máximas proyectadas se mantienen en general en un rango promedio de 17 °C a 19 °C en el caso de la RCP 4.5 y de 17.5 °C a 19.3 °C para la RCP 8.5.



Se puede observar que las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5, tienen la misma tendencia a aumentar la temperatura máxima respecto la histórica en todos los meses, excepto la RCP 4.5 en la segunda mitad de año.

El modelo CANESM2 en general sugiere un mayor aumento en ambas rutas de concentración, para la RCP 4.5 este modelo predice incrementos de enero a setiembre desde valores de 0.8 °C hasta 1.8 °C a por encima de los promedios mensuales históricos observados, el modelo HADGEM2-ES, por su parte, sugiere proyecciones muy similares al anterior en los meses que van desde diciembre a mayo con incrementos de hasta 1.3 °C las cuales se presentan en los meses de campaña agrícola; finalmente, el modelo MIROC 5 es el que sugiere menores incrementos en la primera mitad del año en los meses de campaña respecto a la información histórica observada de este parámetro de temperatura.

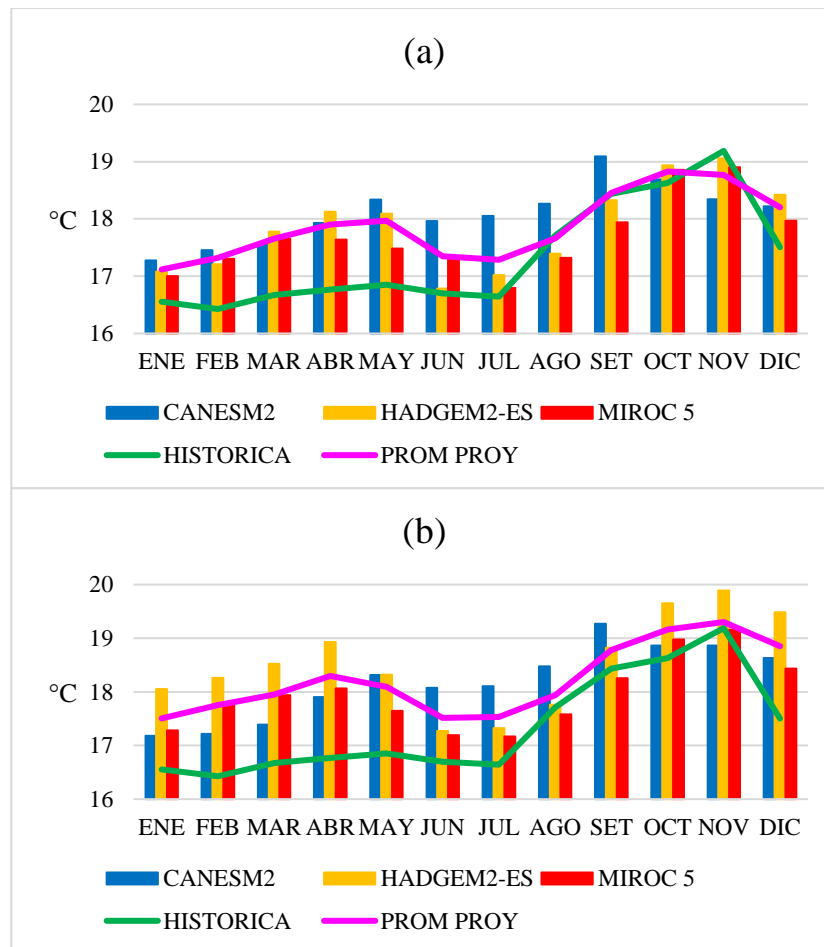


Figura 59. Promedios Tmax 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

Si observamos la Tabla 28, la RCP 4.5 en el escenario del modelo CANESM2 presenta generalmente incrementos en todo el ciclo vegetativo y una reducción porcentual de 4.85% únicamente en el mes de noviembre, lo cual significa que bajo este escenario la temperatura máxima en el mes de noviembre disminuirá en un 4.85% respecto la histórica observada desde 2006 al 2021; el modelo HADGEM2-ES sugiere incrementos promedios del 5% por encima de la histórica en los meses de campaña

agrícola; finalmente el modelo MIROC 5 presenta valores de incremento porcentual muy similares al modelo anterior (HADGEM2-ES)

Para la RCP 8.5, en general se nota las variaciones en incrementos porcentuales en los tres modelos, el modelo CANESM2 sugiere, para los meses de campaña, picos elevados por un poco más del 7% únicamente en el mes de abril, en el resto de meses de campaña mantiene incrementos relativamente constantes de un promedio de 5% respecto de los valores históricos observados; por su parte el modelo HADGEM2-ES nos sugiere incrementos en todo el año, estos incrementos son relativamente altos para los meses de diciembre a mayo, con valores de hasta 13.51% en el mes de abril; así mismo, finalmente, el modelo MIROC 5 sugiere incrementos no mayores al 9% en los meses de interés, que son los meses de campaña agrícola.

Tabla 24. Variación porcentual de proyecciones de temperatura máxima mensual respecto al histórico mensual.

Meses	Escenarios de modelos climáticos					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANES M2	HADGEM 2-ES	MIRO C 5	CANES M2	HADGEM 2-ES	MIRO C 5
Ene	4.60%	3.34%	2.84%	3.99%	9.55%	4.65%
Feb	6.57%	5.01%	5.61%	5.04%	11.75%	8.71%
Mar	5.56%	7.01%	6.21%	4.56%	11.74%	8.05%
Abr	7.27%	8.49%	5.47%	7.10%	13.51%	8.10%
May	9.29%	7.73%	3.96%	9.13%	9.17%	4.97%
Jun	8.18%	0.55%	3.92%	8.91%	3.71%	3.20%
Jul	8.93%	2.37%	0.93%	9.27%	4.31%	3.32%
Ago	3.40%	-1.98%	-	4.73%	0.30%	-
Sep	3.83%	-0.64%	2.44%	4.89%	2.25%	0.81%
Oct	0.34%	-	2.88%	4.89%	2.25%	1.08%
Nov	0.34%	1.76%	1.30%	1.32%	5.86%	1.98%
Nov	-4.85%	-0.75%	-	-1.86%	4.02%	-
Dic	4.25%	5.43%	1.65%	2.75%	6.65%	0.20%
Dic	4.25%	5.43%	2.75%	6.65%	11.73%	5.51%

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la Estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.



c) Análisis de la temperatura mínima

Teniendo en cuenta la sugerencia, “las temperaturas inferiores a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ inhiben decididamente el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre cuando la temperatura mínima o nocturna se mantiene en promedio de hasta 3 a $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a que la variedad Imilla Negra tiene atributos de resistencia climática puede tuberizar óptimamente hasta con temperaturas de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ” (Fairlie & Ortega, 1995). En el diagrama de barras que presenta la Figura 60 se visualiza cómo se comporta las temperaturas mínimas mensuales de los modelos de circulación general bajo la ruta representativa de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5, en el periodo 2023-2050 y la temperatura mínima mensual del periodo 2006 – 2021, notándose que los promedios mensuales de las temperaturas mínimas de los escenarios proyectados incrementan por lo general en un promedio con rango de $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los meses de campaña (nov, dic, ene, feb, mar, abril) estas se encuentran dentro de la temperatura límite óptima para producir el cultivo de papa variedad Imilla Negra bajo condiciones de Azángaro. Se aprecia que las dos rutas de concentración (RCP 4.5 y 8.5), tienen una tendencia a aumentar levemente en todos los meses del año.

En la RCP 4.5 el modelo CANESM2 es el que sugiere mejor los incrementos de T max, y en la RCP 8.5 el modelo MIROC 5, ambas en los meses de interés.

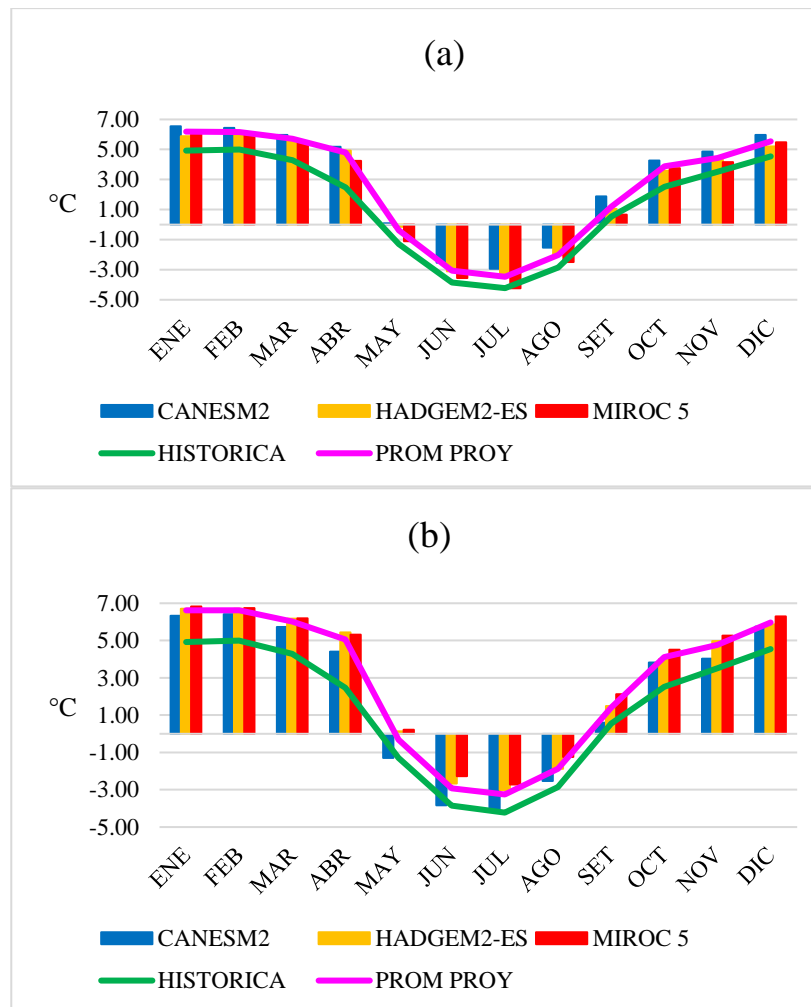


Figura 60. Promedios de Tmin, 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo de enero 2006 a diciembre del 2021 en la estación Azángaro.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Tabla 25 se detalla el análisis de variación de temperatura mínima proyectada respecto a la histórica observada en términos de porcentaje, se nota variaciones significativas entre los meses de octubre – marzo y por lo general variaciones no significativas entre los meses de abril – setiembre.

Las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 sugieren mayores incrementos entre los meses de octubre a abril, los modelos CANESM2 tienen mayores variaciones

debido a que sus escenarios proyectan un incremento promedio mayor incluso al 16% con respecto a las históricas, en este apartado se puede concluir que todos los escenarios en estudio son favorables respecto a este parámetro, debido que las temperaturas mínimas tendrán un incremento relativo, principalmente en los meses de campaña agrícola.

Tabla 25. Variación porcentual de proyecciones de temperatura mínima mensual respecto al histórico mensual.

Meses	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5
Ene	10.35%	6.17%	7.73%	8.94%	11.38%	12.12%
Feb	9.25%	6.58%	6.56%	9.12%	10.96%	11.11%
Mar	10.60%	8.94%	7.36%	9.08%	11.90%	12.06%
Abr	16.94%	15.34%	11.10%	12.06%	18.50%	17.73%
May	8.66%	7.25%	1.21%	0.00%	8.96%	9.46%
Jun	8.52%	4.84%	1.99%	0.13%	7.72%	10.20%
Jul	8.18%	6.30%	-0.09%	1.28%	7.70%	9.56%
Ago	8.24%	4.99%	2.20%	2.00%	6.07%	9.96%
Sep	7.78%	2.92%	0.70%	0.31%	5.57%	9.28%
Oct	10.06%	6.18%	7.11%	7.53%	8.60%	11.48%
Nov	7.68%	4.67%	3.71%	2.99%	8.40%	10.05%
Dic	8.46%	3.88%	5.50%	7.13%	7.84%	10.40%

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

d) Análisis de evapotranspiración

Se generó el diagrama de barras de la Figura 61, se visualiza cómo actúa la evapotranspiración promedio mensual proyectada en las dos rutas GCM, RCP 4.5 y 8.5 para el periodo 2023-2050 y la histórica del periodo 2006 – 2021, se observan incrementos entre los meses de marzo a agosto y en el mes de octubre, diciembre y enero; sin embargo, los meses de interés están comprendidos de noviembre a abril.

Para la RCP 4.5 se observa que el modelo HADGEM2-ES es la que sugiere los mayores niveles de incrementos de evapotranspiración mensual en todo el periodo de 1

campana agrícola (noviembre a abril), con excepción en el mes de marzo; los modelos CANESM2 y MIROC 5 se comportan con incrementos y reducciones, sin embargo, no superan al modelo HADGEM2-ES. Los valores de evapotranspiración sugeridos en los escenarios de la RCP 4.5 alcanzan sus picos más altos en los meses de octubre y noviembre con más de 135 mm/mes, pero no supera a la ETo histórica del mes de noviembre que registra valores con más de 140 mm/mes; los picos más bajos se encuentran en febrero y abril con valores promedios de 103 mm/mes y 97 mm/mes respectivamente.

Paralelamente, en la RCP 8.5 el escenario del modelo HDGEM2-Eses quien sugiere los mayores incrementos de evapotranspiración a lo largo de la campana agrícola, seguido del modelo MIROC 5, finalmente el CANESM2. Además, los valores son más significativos que los escenarios de la RCP 4.5 respecto a la histórica que comprenden desde marzo a octubre y diciembre a enero, así mismo, los valores más altos de ETo en estos escenarios se sitúan en octubre y noviembre con más de 138 mm/mes y los ms bajos en campana en los meses de febrero y abril con valores de 104 mm/mes y 99 mm/mes de evapotranspiración, respectivamente.

Los incrementos promediados y proyectados se mantienen relativamente constantes en ambas rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5,

En base a condiciones de Azángaro, la evapotranspiración futura generaría una mayor demanda hídrica de los cultivos cuya campana inicia en noviembre y finaliza en abril, esto llevaría a una modificación en la cantidad de lámina de riego aplicada por campana, ya que si no se le aplica un riego generaría un desbalance hídrico ocasionado por el incremento de evapotranspiración, la planta sufriría estrés hídrico provocando un déficit en el rendimiento óptimo esperado. En la sección de análisis de la precipitación, se pudo observar los seis escenarios de cambio climático, estos sugieren



variaciones positivas de precipitación para todos los meses del año, ello nos puede llevar a suponer que el incremento de precipitaciones autorregularía los efectos del aumento de valores de evapotranspiración, de ser así no sería de mucha necesidad modificar la lámina de riego y en el mejor de los casos se podría esperar una producción óptima con una lámina ligeramente reducida. Esto se podrá observar con mejor detalle al ejecutar la simulación del modelo AquaCrop con las proyecciones climáticas y al definir de qué manera afecta el incremento de la evapotranspiración a los rendimientos del cultivo de la papa.

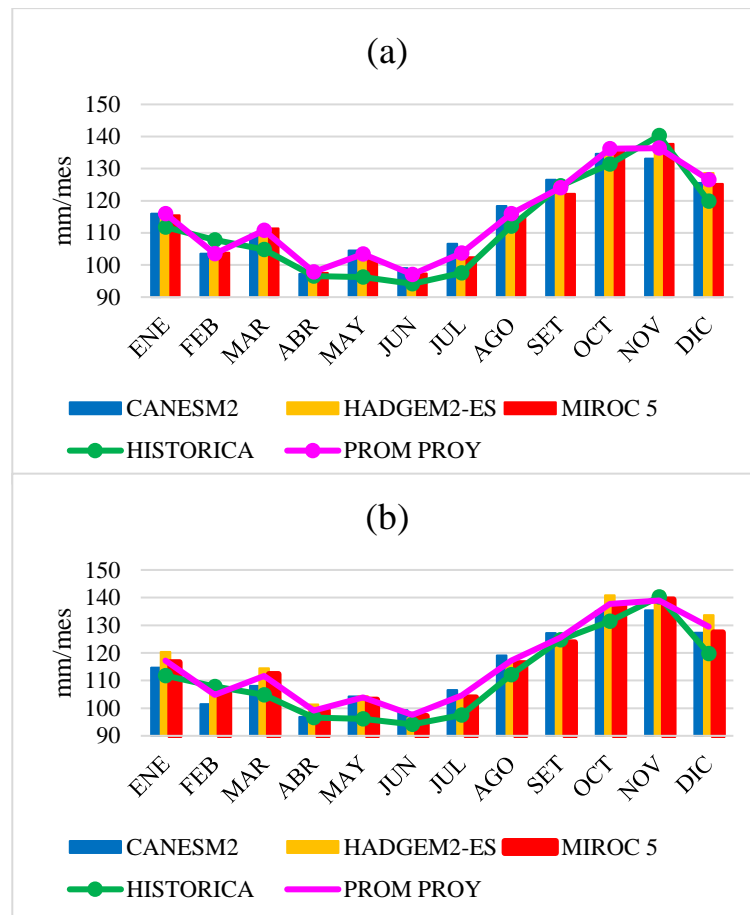


Figura 61. Promedios de evapotranspiración, 2023 – 2050, escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP 8.5. Las líneas trazadas representan promedios de sumatorias de precipitación mensual histórica para el periodo 2006 - 2021 en la estación Azángaro.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Tabla 26 se puede observar el análisis de variación porcentual de la evapotranspiración proyectada en función de la evapotranspiración histórica, se observa variaciones de incrementos en los meses de mayo y julio pero estos no influirían debido a que no conforman los meses de campaña agrícola del cultivo en estudio, se tiene a los meses de marzo y diciembre con incrementos porcentuales de evapotranspiración muy significativos que comprenden desde 3.15% hasta 11.57%, este último en el mes de diciembre para el modelo HADGEM2-ES de la RCP 8.5,

paralelamente se tiene reducciones muy significativas en los meses de febrero y noviembre con indicadores porcentuales de evapotranspiración que comprenden desde -0.35% hasta -5.86% en todos los escenarios proyectados. Las celdas rellenas de color verde representan valores elevados y las de color rojos valores bajos.

Tabla 26. Variación porcentual de evapotranspiración proyectada versus histórica para el lugar de estudio.

Meses	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5
Ene	3.78%	3.78%	3.33%	2.60%	7.66%	4.37%
Feb	-4.00%	-4.00%	-3.71%	-5.86%	-0.35%	2.13%
Mar	4.48%	4.48%	6.31%	3.15%	9.18%	7.15%
Abr	0.67%	0.67%	1.04%	0.28%	4.98%	2.78%
May	8.63%	8.63%	6.18%	8.33%	8.46%	7.18%
Jun	5.23%	5.23%	3.45%	5.40%	2.35%	3.27%
Jul	9.29%	9.29%	5.02%	9.29%	5.94%	6.57%
Ago	5.59%	5.59%	2.53%	6.23%	3.67%	3.72%
Set	1.47%	1.47%	-2.01%	1.95%	0.73%	0.67%
Oct	2.41%	2.41%	3.87%	2.81%	7.15%	4.36%
Nov	-5.10%	-5.10%	-1.84%	-3.48%	1.33%	0.62%
Dic	4.82%	4.82%	4.56%	6.26%	11.57%	6.36%

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

En la Figura 62 se presentan las gráficas de las curvas dispersión con líneas suavizadas las cuales representa la distribución de evapotranspiración total anual para un periodo histórico (2006 – 2021) y el periodo proyectado (2023 – 2050), indicando proyecciones para las dos rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 y de tres modelos de circulación general (CANESM2, HADGEM2-ES y MIROC 5) para el lugar en estudio.

Se observa que las curvas alcanzan valores superiores respecto a la evapotranspiración total anual histórica, en ese sentido, los picos históricos más altos

se presentan en los años 2007, 2010 y 2017 con valores anuales de 1377 mm, 1368 mm y 1410 mm respectivamente, así mismo los valores históricos más bajos se encuentran en los años 2011 y 2018 con niveles de 1290 mm y 1263 mm respectivamente.

Las proyecciones anuales de evapotranspiración para los escenarios de la RCP 4.5, variarían en un rango que va desde 1211.40 – 1601.10 mm, y para la RCP 8.5 se tienen variaciones desde 1238.90 – 1585.90.

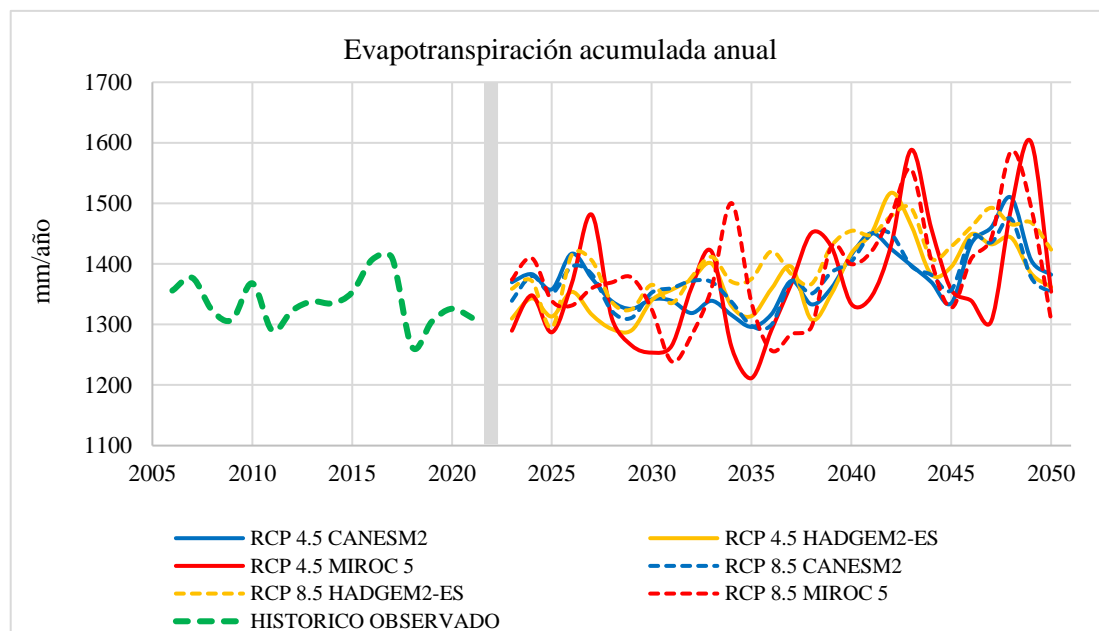


Figura 62. Evapotranspiración anual para el periodo 2023-2050 para 6 modelos de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI.

Se sostiene la evapotranspiración anual histórica del periodo 2005-2015, la línea continua corresponde al escenario RCP 4.5 y discontinua al escenario RCP 8.5. La franja ploma vertical indica el fin de la evapotranspiración histórica y el inicio de las proyecciones.

Se analiza el comportamiento de las proyección de los modelos de la RCP 4.5 y se tiene al modelo CANESM2, en la primera mitad de proyección (2023 - 2035)

sugiere disminuciones de evapotranspiración, alcanzando su pico más bajo en el año 2035 con 1296 mm, y para la segunda mitad (2035 -2050) tiende a incrementar sus valores hasta 1509.50 para el año 2048; mientras tanto el modelo HADGEM2-ES en general su curva proyectada tiende a incrementarse siendo en su segunda mitad de proyección (2035 - 2050) en donde presenta sus valores más extremos que van desde 1308.00 mm en el año 2038 hasta valores máximos de 1517.50 en el año 2042; finalmente se tiene al modelo MIROC 5 quien vendría ser la más extremista de acuerdo a su curva proyectada, esto debido a que sugiere valores muy altos de hasta 1601.10 mm en el año 2049 y valores bajos de hasta 1211.40 en el año 2035; en pocas palabras se puede deducir que los tres modelos para La RCP 4.5 sugieren incrementos promedios de 70 mm en el periodo 2023 – 2050.

Se analiza el comportamiento de las proyección de los modelos de la RCP 8.5, el modelo CANESM2, se comporta muy similar al modelo CANESM2 de la RCP 4.5 sugiriendo mayores diferencias en los años 2031 al 2033 con incrementos de 50 mm; el modelo HADGEM2-ES en general tiende a incrementarse, mostrando sus picos más altos en los años 2043 y 2047 con valores de 1491.60 y 1492.70 mm respectivamente y su valor más bajo en el año 2025 con 1294 mm; finalmente el modelo MIROC 5 que al igual que en la RCP 4.5 volvería a ser la más extremista con valores por encima de 1500 mm en los años de 2034, 2043 y 2048 y valores bajos de hasta 1238.90 en el año 2031.

4.1.3.2. Efecto del cambio climático en rendimientos proyectados

Al ejecutar la simulación del modelo agrometeorológico AquaCrop haciendo uso de la información climática proyectada (2023-2050) en precipitaciones, temperatura máxima, temperatura mínima y evapotranspiración se obtuvo rendimientos en peso seco, cabe reiterar que este modelo agrometeorológico realiza

simulaciones de rendimientos en peso seco, es así que a estos valores de rendimientos se le añadió su humedad en (%) para así obtener un rendimiento en peso fresco.

En la Figura 63 se aprecia los resultados de simulación del modelo AquaCrop para los rendimientos en peso fresco en las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5, para periodo proyectado 2023 – 2050, estos rendimientos se ajustaron en el proceso de calibración y validación del modelo AquaCrop entre valores de rendimiento observados en el periodo 2017 – 2018, y los rendimientos en peso fresco simulados para el periodo 2006 - 2021. Los resultados de los rendimientos obtenidos nos indican que las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) sugieren una leve estabilidad en los rendimientos para la primera mitad de simulaciones proyectadas (2023-2037) manteniendo un rendimiento promedio anual de 11.26 Tn/ha, y para la segunda mitad (2038-2050) se observa un notorio descenso en los rendimientos del cultivo con una media anual de 10.84 Tn/ha. Se puede decir que las proyecciones de precipitación autorregularían los efectos del incremento de la temperatura en la mayoría de los años, sin embargo, aún se observan caídas de la producción en los años más extremos.

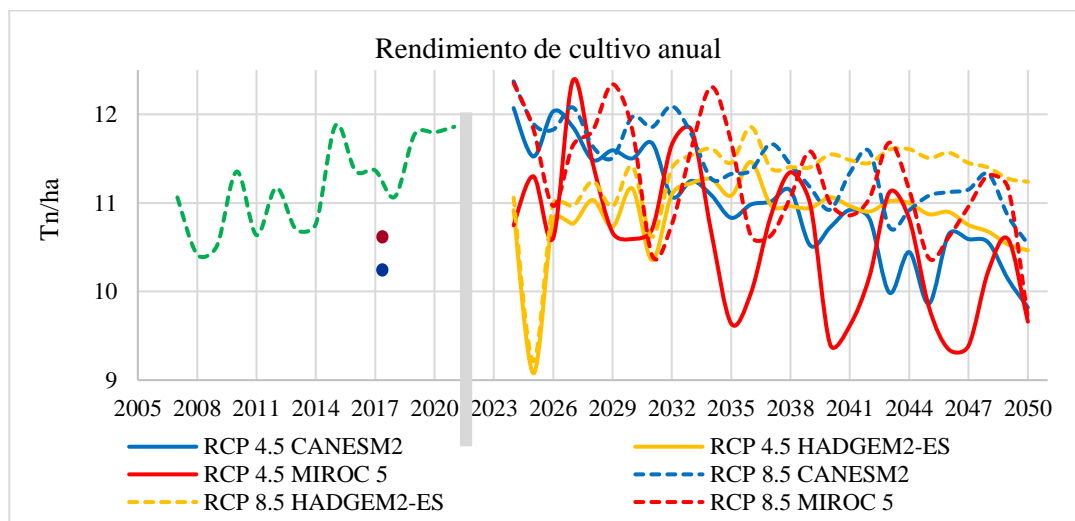


Figura 63. Rendimiento de cultivo anual para el periodo 2023-2050 para 6 escenarios de cambio climático, comparada con valores históricos 2006-2021.



Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI y procesada en el modelo agrometeorológico AquaCrop.

En la figura anterior se aprecian los rendimientos peso fresco que fueron simulados para el periodo 2006-2021, línea verde, las líneas continuas corresponden al escenario RCP4.5 y discontinuas al escenario RCP 8.5. Los puntos azul marino y granate corresponden a los rendimientos en peso fresco simulados para la calibración y validación respectivamente en el periodo 2017. La barra vertical color gris indica el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

Así mismo, de la Figura 63 se puede interpretar que los rendimientos en peso fresco se mantienen relativamente estables desde 2023 a 2037, y los promedios descenden en el periodo 2038 al 2050 para los seis escenarios futuros de cambio climático.

En la Tabla 27 se visualiza los rendimientos máximos y mínimos obtenidos al simular el modelo AquaCrop con los datos climáticos de los seis escenarios de cambio climático proyectados para el periodo 2023 – 2050, se observa que el rendimiento más alto es alcanzado por el escenario RCP 4.5 MIROC 5 y el más bajo por el escenario RCP 4.5 HADGEM2-ES, lo cual se puede observar en el gráfico de la figura 63.

Tabla 27. Rendimientos máximos y mínimos simulados para el periodo 2023-2050.

Escenarios	Rendimientos (2023-2050) (Tn/ha)	
	Máxima	mínima
RCP 4.5 CANESM2	12.07	9.82
RCP 4.5 HADGEM2-ES	11.462	9.077
RCP 4.5 MIROC 5	12.382	9.347
RCP 8.5 CANESM2	12.372	10.537
RCP 8.5 HADGEM2-ES	11.857	9.213
RCP 8.5 MIROC 5	12.353	9.702

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI; procesada en el modelo agrometeorológico AquaCrop.

Para las dos trayectorias de concentración de RCP (4.5 y 8.5), se realizó el análisis de cambio porcentual de la producción simulada futura (2023-2050) la cual se observa en la Tabla 28, se analizó el coeficiente de cambio porcentual de la producción simulada histórica (2006-2021) con ello se determinó el impacto del cambio climático en la producción del cultivo de papa variedad Imilla Negra bajo condiciones de Azángaro, los resultados son positivos para los escenarios de la RCP 8.5, y negativos para los escenarios de la RCP 4.5, lo cual, calculando la media aritmética de las variaciones se llega a la síntesis de que las condiciones climáticas futuras tendrán levemente un impacto negativo para la producción del cultivo de papa variedad Imilla Negra bajo condiciones normales de Azángaro.

Tabla 28. Variación porcentual de rendimiento simulado (2023–2050) respecto al rendimiento histórico simulado periodo 2006 – 2021.

Respecto a histórico (2006-2021)	Escenarios		
	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5
RCP 4.5	-1.90%	-2.93%	-5.40%
RCP 8.5	2.30%	0.92%	0.49%

Fuente: Elaborado con datos generados por CPTEC/INPE y disponibles en la Plataforma PROJETA y con información de la estación Azángaro, proporcionada por SENAMHI; procesada en el modelo agrometeorológico AquaCrop.

4.2. DISCUSIÓN

Primero. El presente experimento la evaluación se efectuó en el periodo de estudio del 04 de noviembre del 2017 al 27 de abril de 2018, donde se ha logrado obtener, los rendimientos de 11.07 Tn/ha, con respecto a lo simulado con AquaCrop se tuvo un rendimiento de 10.81 Tn/ha, ligeramente aproximado a lo encontrado por (Canllahui, 2013), con el método del lisímetro que obtuvo un rendimiento en papa con un promedio de 12.07 Tn/ha. Los efectos del cambio climático lograron repercutir en los rendimientos de producción de cultivo de la papa en el distrito de Azángaro, debido a los valores de evapotranspiración que fueron estimadas con la ecuación de Penman Monteith calibrada con la ecuación de Hargreaves para condiciones de Azángaro.

Segundo. De acuerdo a las proyecciones de precipitaciones (2023-2050) realizadas para la RCP 4.5, los valores medios de los escenarios estiman disminuciones de precipitación desde diciembre a mayo con reducciones de 0.28 mm/día, y para la RCP 8.5 el valor medio de precipitación diaria disminuye en 0.26 mm/día, esto relativamente no concordaría con la tendencia de los resultados del



trabajo (Sanabria, Marengo, & Valverde, 2009), quienes trabajaron en “Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno)”, quizá porque los resultados de su trabajo son para el periodo proyectado 2071 al 2100, quienes encuentran incrementos en precipitaciones de hasta 2 mm/día, esto es levemente contrario a nuestros resultados (2023-2050). Ahora, respecto a la temperatura proyectada y promediada (Sanabria et. Al 2009) encuentra aumentos de 2 °C a 4 °C, y mayores aumentos de hasta 6 °C al norte de lago, esto es relativamente similar a los resultados del presente trabajo, ya que encuentro incrementos promedios de 0.54 °C para los escenarios de la RCP 4.5 y 0.88 °C para la RCP 8.5, cabe mencionar que esto es para un lugar de estudio puntual. En comparativa, sucede algo muy similar con el trabajo de (Lujano Laura, Hidalgo Sanchez, Díaz Aguilar, Lujano Laura, & Tapia Aguilar, 2016), “Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP 4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el altiplano peruano”, sin embargo en esta pesquisa solo se estudia el parámetro de precipitación proyectado del 2071 al 2100; asimismo, encuentra resultados relativamente contrarios, ya que se trata de incrementos de lluvias.

Tercero. Los rendimientos peso fresco que se obtuvo de la calibración y validación del modelo AquaCrop, en el periodo 2017 y los rendimientos peso fresco simulados para 2006 – 2021, sugieren un ligero incremento respecto al rendimiento obtenido en la campaña de estudio 2017 (12.25 Tn/ha) y a los rendimientos simulados para el periodo 2006 – 2021. Es así que nuestra síntesis lograría ser afirmada por (Calderón, 2017), en la que se sostiene: “El Perú se posicionó como el principal productor de papa en América Latina”. En 2016 se produjeron más de 4.5 millones de toneladas de este tubérculo, y se sembró en una superficie de 318.530 hectáreas en 19



regiones del país: “Que dieron un rendimiento promedio de (14.5 Tn/ha)” (Calderón, 2017).

Cuarto. Según la relación que existe entre el tipo de riego por secano en condiciones de cambio climático y los rendimientos peso fresco simulados por el modelo AquaCrop, (simulación para las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5) para el periodo proyectado 2023 – 2050, las simulaciones optimistas futuras sugieren hasta un rendimiento máximo de 12.38 Tn/ha como es en el caso para el escenario RCP 4.5 MIROC 5, y un rendimiento mínimo de 9.08 Tn/ha para el escenario RCP 4.5 HADGEM2-ES, en consecuencia, se tiene un rendimiento medio proyectado de 11.06 Tn/ha, y un promedio histórico de 11.18 Tn/ha, en efecto se tiene una disminución total en media de 0.12 Tn/ha en el periodo 2023 – 2050, este valor coincidiría relativamente con lo que resume (Belizario, 2015), quien trabajó impactos de cambio climático con valores tedenciales, así mismo indica “el cambio climático viene afectando a los parámetros de temperaturas y precipitaciones, y esto influye negativamente en el rendimiento de los cultivos”.



V. CONCLUSIONES

Primero. El cultivo a lo largo del periodo vegetativo tiene una duración de 175 días empezando la siembra el 04 de noviembre del 2017 y concluyendo el 27 de abril de 2018. Los parámetros fueron obtenidos de 16 fechas de muestreo con 3 repeticiones por cada fecha. En relación a los rendimientos, se obtuvieron promedios de 13.14 Tn/ha y 12.25 Tn/ha, aplicando una lámina de riego óptima y una lámina de lluvia (reducida), con volúmenes de 6713 m³/ha y 4302 m³/ha respectivamente, bajo condiciones climáticas de Azángaro con un suelo de textura franco arenosa. Se ha determinado que, en comparación con el experimento de riego por secano (reducido), el experimento de riego óptimo alcanzó valores ligeramente superiores en términos de cobertura del dosel, profundidad de las raíces y producción de biomasa. Una vez obtenida la información de campo para todo el período vegetativo del cultivo, se realizó el ingreso de datos según corresponda en el modelo agrometeorológico AquaCrop. Se simuló el rendimiento de la papa variedad Imilla Negra con el modelo, calibrándose con un bloque experimental en condiciones óptimas de riego, y validándose bajo condiciones de riego por secano, es decir con lámina reducida. A continuación, se evaluó las variables: biomasa aérea seca (B) y cobertura dosel (CC) simulada por AquaCrop 6.1, finalmente mediante el uso de indicadores estadísticos se comparó los valores observados en campo y obtuvo una alta correlación, que según Molnar (2011), califica a la simulación como muy buena a excelente.

Segundo. Los efectos del cambio climático lograrán repercutir en los rendimientos de producción de cultivo de la papa en el distrito de Azángaro en proyecciones 2023 al 2050, debido a los valores de evapotranspiración las cuales fueron calculadas haciendo uso de datos de temperaturas en la ecuación de Hargraves,



ajustada para condiciones de Azángaro. En cuanto a las proyecciones de T° max, se logró hallar incrementos promedios anuales que ascienden de un promedio histórico de 17.3°C a un promedio proyectado de 18.05°C lo cual representa un 4.09%, los más significativos son desde diciembre a mayo; así mismo, los valores de T° min también se incrementarán siendo las más relevantes desde enero a abril las cuales ascienden de un promedio histórico de 1.3°C a una proyección promedia de seis escenarios de 2.55°C . Los cambios de temperatura harán que los promedios de evapotranspiración total anual aumenten en un 3.18%, los incrementos serán más relevantes desde agosto a enero del año siguiente. En lo que respecta al parámetro de precipitaciones, las lluvias disminuirán de un promedio histórico de 610.51 mm a 511 mm anuales, esta diferencia representa un 16.19% de precipitaciones respecto a la histórica observada, se concluye que habrá disminución de lluvias de agua en 4 escenarios de cambio climático, lo que demuestra que para las condiciones de Azángaro podría ser necesario modificar las láminas de riego futuras.

Se determinó los valores de grado de dependencia entre los valores simulados y observados con un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student para 24 muestras de biomasa aérea seca registradas en 3 días para cada bloque experimental y un promedio de 24 muestras del dosel registradas en 18 días, obteniéndose, grados de significación positiva en los 2 experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson entre 0.98 y 1.00 en los dos parámetros que se evaluaron, de tal manera indica una dependencia lineal positiva entre ambos valores (simulados – observados).

Tercero. Los efectos de cambio climático generan impactos en el rendimiento del cultivo de la papa, se concluye que los valores de rendimiento se mantienen



relativamente estables desde 2023 a 2037, con un rendimiento promedio anual de 11.26 Tn/ha; sin embargo, los promedios empiezan a descender en el periodo 2038 al 2050 descendiendo a un promedio anual de 10.84 Tn/ha.



VI. RECOMENDACIONES

Primero. La investigación está enfocada a la producción de papa, en su variedad Imilla Negra, obtenida del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), esta variedad es empleada por la población debido a que la variedad Imilla Negra se ha adaptado al medio, motivo por la cual se ha empelado en la investigación con la finalidad propiciar una producción de mayor volumen por lo que se recomienda asegurar los periodos de siembra, por lo general al mes de octubre ya que a partir de este mes las precipitaciones empezarán a incrementarse para los años venideros (2023 - 2050).

Segundo. La continuidad del estudio en pesquisas con uso de la herramienta digital agrometeorológica AquaCrop, ya que es un herramienta que nos permite optimizar los recursos y ayuda a mejorar la toma de decisiones permitiendo mejorar las estrategias de manejo de cultivo, ya que, operada adecuadamente con una enriquecida información, datos y valores, estima la prolongación de rendimientos, biomasa y calendarios de riego para cultivos y otros mediante procesos de simulación para periodos futuros.

Tercero. La continuidad en trabajos de investigación referidos al cambio climático, orientados a los impactos sobre parámetros de cultivos que son ancestrales de la región de Puno, el Perú y Latinoamérica, de tal manera se pueda generar alternativas de cambio, identificar restricciones, análisis de capacidad máxima de producción, simulaciones en condiciones extremas, estimaciones de eficiencias y rendimientos de cultivo de tal manera se pueda mejorar la producción agrícola y aportar para la garantía de la seguridad alimentaria.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, J., & Mejia, J. (2005). Análisis dinámico de tanques superficiales, circulares y rectangulares. Obtenido de <https://vdocuments.site/documents/analisis-dinamico-de-tanquespdf.html>
- ACI. (2006). *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary* (ACI 350.3-06). Obtenido de <http://docshare01.docshare.tips/files/30685/306853030.pdf>
- Alarcón, L. (2015). *Efecto del Cambio Climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro bajo condiciones de la Molina utilizando el modelo Aquacrop*. Lima, Peru: UNALM.
- Allen, R. P. (2006). En *FAO* (pág. 56). Roma: FAO.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). En *FAO* (pág. 56). Roma: FAO.
- Amador, J. A., & Alfaro, E. (2009). Métodos de reducción de escala: Aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 39-52.
- ASCE/SEI.7-10. (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. Estados Unidos.
- Ascue Arostegui, G. A. (3 de junio de 2019). *AgroPuno.gob.pe*. Obtenido de Día Nacional de la Papa 30 de Mayo: <https://www.agropuno.gob.pe/dia-nacional-de-la-papa-30-de-mayo/>
- Belizario Quispe, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin*, Vol 17 N° 1: 47 - 52.
- Cahuana Quispe, R., & Arcos Pineda, J. (Agosto de 2002). *Varietades Nativas y Mejoradas de Papa en Puno*. Lima, Perú: INIA.



- Calderón, J. (2017). La papa Peruana en Sudamerica y el Mundo. *Lanzamiento de actividades por el Día Naccional de la Papa* (págs. 2-3). Lima: La República.
- Canllahui, M. (2013). *Determinacion de la evapotranspiracion y coeficiente de cultivo (Kc) en la produccion de papa (Solanum_tuberosum L.) Var. Silver en el CIP-ILLPA-Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Carcasi, J. (2015). *Efecto de las sequias meteorológicas en la producción de los cultivos papa y quinua en la provincia de Huancané*. Huancane,Puno: Universidad Ncional del Altiplano.
- Carneiro de Barros, R. (1999). Resposta sísmica de tanques de armazenaminto de líquidos. Presentación Power Point. Portugal: Universidad de Porto.
- Carrion, J., & Corpus, C. B. (2015). Procedimiento de diseño estructural de un reservorio circular apoyado de concreto armado cumpliendo los parametros de la propuesta de norma E030 2014 para la zona de Cajamarquilla. Lima.
- Chaduvula, U. (2013). Fluid-Structure-Soil Interaction Effects on Seismic Behavior of Elevated Water Tanks. India. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813000155>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., . . . Marengo, J. (december de 2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change, Vol.3* (No.5), 512 - 525. doi:10.4236/ajcc.2014.35043
- Compagnoni, M., & Curadelli, R. y. (2012). *Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica*. Obtenido de <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4187/4113>
- Cortés, C. (2013). *Uso del modelo aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta*. Colombia: FAO.



- Cortés, Y., & Alarcón, J. (30 de julio de 2017). Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca - Colombia. Universidad de Córdoba.
- Cortéz, C. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca*. Colombia: FAO.
- Cosio, E. (15 de junio de 2010). Clima de Cambios. (P. U. Perú, Entrevistador)
- Danilo, J. (2005). *Determinación de las etapas críticas en el desarrollo fenológico del cultivo de la papa Solanum phureja, frente al ataque de la polilla guatemalteca Tecia solanivora (Lepidoptera: Gelechiidae)*. Colombia. Recuperado el 22 de Agosto de 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a06.pdf>
- Deepak, K. (2016). Comparative Study of Dynamic Analysis of Rectangular Liquid Filled Containers Using Codal Provisions. India. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816303137>
- Dias del Valle, J. (2013). *Análisis sísmico de depósitos*. Obtenido de http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COA48_TC.pdf
- DIEA-DRA. Puno. (15 de Enero de 2021). *Información Estadística - DRA Puno*. Obtenido de DIRECCIÓN REGIONAL AGRARIA PUNO: <https://www.agropuno.gob.pe/informacion-estadistica/estadistica-agricola/>
- Dirección Regional Agraria - Puno. (19 de mayo de 2020). *AgroPuno.gob.pe*. Obtenido de Día Nacional de la papa: <http://www.agropuno.gob.pe/?q=node/1450>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Irrigation and drainage paper. *Yield response to water*. FAO, 193-201.



- Duarte, C. (2012). *Efecto del coeficiente de estrés hídrico sobre Efecto del coeficiente de estrés hídrico sobre* (Vols. Vol. 21, No. 4.). La Habana, Cuba. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/932/93223755007.pdf>
- EcuRed. (08 de 06 de 2016). *Ecured*. Obtenido de Rendimiento Agrícola: https://www.ecured.cu/Rendimiento_agr%C3%ADcola
- Egúsqüiza, B. R. (2000). *La papa: producción, transformación y comercialización*. Lima: International Potato Center, 2000.
- Fairlie, T. E., & Ortega, A. (1995). Efecto de la presencia de heladas simuladas en diferentes estados. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 7/8: 86-93.
- FAO. (1990). *Evapotranspiración del cultivo*. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. En FAO. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje.
- FAO. (2018). *Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar*. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s03.pdf>
- FAO. (2020). *Uso del modelo aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta*. Cordoba. Recuperado el 10 de Setiembre de 2019, de <http://www.fao.org/3/i3430s/i3430s.pdf>
- Fernandez-Davila, V. y. (2006). *Estudio paramétrico de la respuesta símica de estanques elevados de hormigón armado con aislación símica en la base*. Obtenido de www.upf.br/seer/index.php/rsae/article/download/322/232



- Flores, H. (2012). *Simulación del rendimiento de maíz (zea mays l.) en el norte de sinaloa usando el modelo AquaCrop*. Mexico. Recuperado el 10 de Setiembre de 2019, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a4.pdf>
- Hirsh, R., Helsel, D., Cohn, T., & Gilroy, E. (1992). *Handbook of Hydrology*. s.l.: McGraw- Hill.
- Housner, W. (1963). *Comportamiento dinámico de tanques de agua*. Cajamarca, Peru: Traducido en 2013 por Alex Palomino.
- Hsiao TC, Fereres E., Acevedo E., Henderson DW. (1976). Estrés hídrico y dinámica de crecimiento y rendimiento de plantas de cultivo. *Lange OL, Kappen L., Schulze ED. (eds) Agua y vida vegetal. Estudios ecológicos (análisis y síntesis)*, 281-305.
- Huaranga, P. (2015). *Evaluación de la respuesta sísmica no lineal de reservorios elevados tipo INTZE*. Lima, Peru: PUCP.
- IGP. (2014). *Evaluación del Peligro Sísmico en Perú*. Lima, Perú. Obtenido de <http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/783>
- INEI. (2015). *Producción del cultivo de la papa en el Perú*. LIMA.
- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. Ginebra, Suiza: IPCC*.
- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2013). *Cambio climático 2013: 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 [Equipo de redacción principal: Pachauri, R., Stocker, F. y Qi. Ginebra, Suiza: IPCC.*
- IPCC. (2013). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 2013. Cambio climático 2013, bases físicas: Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes (en línea).
- Jimenez, A. (2017). *Identificación y evaluación poblacional del nematodo de papa (Solanum tuberosum L.) en dos variedades de papa en dos localidades de Puno - Peru.* puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Kale, S. (2017). *Evaluating AquaCrop Model for Winter Wheat under Various Irrigation Conditions in Turkey.* Recuperado el 10 de Setiembre de 2019, de <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/510919>
- Kiroiwa, J. (2012). Gestión de riesgo de desastres sismos y tsunamis. Callao, Peru: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Obtenido de <http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/2012/TOTAL/1.%20Gestión%20de%20Riesgo%20de%20Desastres-Sismos%20y%20Tsunamis.pdf>.
- Lenderink, G., Buishand, A., & willem, V. (2007). Estimates of future discharges of the river rhine using two scenario methodologies. direct versus delta approach. *Hydrol. Hearth Syst. Sci.*, 13(3), 1145 - 1159. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581817303324#bib0105>
- Leoni, A. (2005). Apuntes de Coeficiente de Balasto. Argentina: Universidad Nacional de la Plata.
- Li, Y., & Wang, J. (2012). A supplementary, exact solution of an equivalent mechanical model for a sloshing fluid in a rectangular tank. *Journal of Fluids*



- and Structures.* Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974612000540>
- Llaza, O. (2012). Análisis sísmico y diseño estructural del Reservorio R-10 San Antonio. II Ciclo de conferencias: Mega construcciones en el Perú Capítulo de Estudiantes ACI-Universidad Carlos Mariátegui. Moquegua. Obtenido de (https://www.youtube.com/watch?v=oD9_hNVf1Wk)
- Lujano Laura, E., Hidalgo Sanchez, L. S., Díaz Aguilar, R. D., Lujano Laura, A., & Tapia Aguilar, B. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 Y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el altiplano peruano. *Investig. Altoandin.*, Vol 18(Nº 2), 195 - 204.
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S., Sueiro, G., Claudine, D., Marcely, S., . . . Giarolla , A. (2018). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol*, 132, 663–682. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>
- Martín Martín , R., & Jerez Mompie, E. (01 de marzo de 2017). *Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (Solanum tuberosum L.) variedad romano*. Obtenido de Mi SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362017000100009&script=sci_arttext&tlng=en
- Martinez, E., & Sanchez, L. (2004). Análisis sísmicos de tanques elevados de agua sobre diferentes sistemas estructurales de hormigón reforzado en la ciudad Bucaramanga (tesis para optar título de ingeniero civil). Bucaramanga: Universidad de Santander. Obtenido de (<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2309/2/114546.pdf>)



- Martos, F., & Mosqueira, R. (2013). Evaluación de los esfuerzos de un reservorio circular entre el método estático y el método dinámico del diseño sismorresistente. Cajamarca, Peru.
- Meza, R., & Sánchez, M. (2015). *Evaluación del rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación del riego deficitario (PRD) utilizando cintas de riego*. Lima, Peru. Recuperado el 22 de Agosto de 2019, de <file:///C:/Users/INTEL/Downloads/Dialnet-EvaluacionDelRendimientoDelCultivoDePapaBajoLaApli-6171079.pdf>
- MINAGRI. (2014). *Papa. Principales aspectos agroeconómicos*. Obtenido de http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/2014/papa_2014.pdf
- Miranda, C. (2013). Modelamiento sísmico para un reservorio elevado con estructura cilíndrica de soporte tipo Intze de 3000 m³. *Tesis de ingeniería civil*. Puno, Peru: Universidad Nacional del Altiplano.
- Monroy, C., Bolaños L., A., Muñoz P., A., & Blondet S., M. (2004). Demandas Sísmicas con Peligro Uniforme en el Peru. Peru.
- Moriasi, D. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 885-900.
- Morrison, N. (1993). Interacción Suelo-Estructura: Semi-espacio de Winkler. *Tesis de maestría*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Moslemi, M., & Kianoush M., R. (2012). Parametric Study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks. *Engineering Structures*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029612002210>
- MVCS. (2016). Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima.



- Nuñez, E. (2011). *Propuesta Tecnológica Para el Mejoramiento del Comportamiento Sísmico de Reservorio Elevado con Estructura de Soporte Tipo Marco*. Lima, Peru.
- Ochoa Cobeña, C. P. (2020). *Calibración, validación y utilización del modelo AquaCrop para el cultivo de la chufa (Cyperus esculentus L. var. sativus Boeck.) en Valencia*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Ordoñez, C. (2016). *Efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad Única bajo condiciones de La Molina*. Lima: UNALM.
- Pabón, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia-CAR.
- Palomino, A. (2018). *Curso de diseño de reservorios apoyados de concreto armado*. Cajamarca, Peru: Ceint Peru.
- Pupiales, A. (2013). *Análisis de la interacción fluido-estructura en el diseño de tanques cilíndricos de acero según las norma americana, neozelandesa, ecuatoriana y métodos simplificados (tesis para optar el título de ingeniero civil)*. Quito: Universidad San francisco de Quito. Obtenido de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2405/1/107099.pdf>
- Quezada, W., & Salinas, A. (2014). *Diseño Y Analisis de un Reservorio Tipo Fuste de 300 M3 en la Ciudad de Trujillo. Tesis para optar el titulo profesional de ingeniero civil*.
- Raes, D., & et Al. (2011). *AquaCrop User's Guide*. Roma: FAO.
- Raes, D., Steduto, Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2012). *Reference Manual AquaCrop 4.0*. Obtenido de <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.



- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, E. (2009). Aquacrop - The FAO Crop Model to simulate Yield Response to Water. En S. P. Raes D., *Main Algorithms and Software Description*. (págs. 438-447). FAO.
- Reategui, K., Aguirre, N., Oliva, R., & Aguirre, E. (2019). Fenología y rendimiento de cuatro variedades de papa en el Altiplano peruano. *Scientia Agropecuaria*, 10(2): 265 – 274.
- RNE. (2018). Reglamento Nacional de Edificaciones. *Diseño Sismorresistente E.030*.
- RPP. (25 de mayo de 2013). *rpp.pe*. Obtenido de Macusani: mayor productor de la papa nativa en Puno: <http://rpp.pe/peru/actualidad/macusani-mayor-productor-de-la-papa-nativa-en-puno-noticia-597835>
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4). 265-267.
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). *Revista peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 134 - 149.
- Sánchez, J. G. (15 de abril de 2017). Cálculo del rendimiento de cultivos según la cantidad de agua empleada, a partir de modelos de simulación numérica. Obtenido de www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12460/tesis.pdf?sequence=1
- Santana, A. (2010). Modelo Winkler para el Análisis de la Respuesta Dinámica de Estructuras Enterradas. *Proyecto de fin de carrera*. España: Universidad de las Palmas el Gran Canaria.



- Seminario, J. F. (2008). Diversidad y variabilidad de papa, con énfasis en el norte peruano. *Universidad Nacional de Cajamarca Facultad de Ciencias Agrarias Programa de Raíces y Tubérculos Andinos*, 45.
- SENAMHI. (2009). *Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030*. Lima.
- SENAMHI. (2015). Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú. Lima.
- Sistema de Información MINAGRI. (20 de noviembre de 2019). *Ministerio de Agricultura y Riego*. Obtenido de Sistema de Información de Cultivos: <http://sissic.minagri.gob.pe/sissic>
- Steduto, p., & Albrizio, R. (2005). Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. *II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency*, Agric. For. Meteorol, Issue 130. 269-281.
- Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2007). *On the conservative behavior of biomass water productivity*. Irrigation Science, Issue 25.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. Roma: FAO Irrigation and Drainage paper.
- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*, 426-437.
- Sucasaca, C., & Mamani V., J. (2017). Evaluacion de los efectos de interaccion suelo-estructura en el estadio universitario UNA-PUNO. Universidad Nacional del Altiplano.
- Ticona, W. (2017). Propuesta de diseño de la captación de agua de lluvia mediante coberturas en las viviendas rurales, con fines de consumo domestico en la comunidad Pucajrani Tiracollo – Ilave. Puno.



- Tunque Centeno, C. (2018). Analisis y diseño de un reservorio apoyado segun el código ACI 350; Tomando como base el modelo mecanico equivalente propuesto por G.W. Housner. Huancavelica, Peru.
- Vargas, H. E. (2015). Estudio sismico en el diseño del reservorio circular apoyado R-8 capacidad 3000 m3 para la ciudad de juliaca. *Tesis de ingenieria civil*. Juliaca, Peru: Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez.
- Velásquez, E. (2008). *El agua virtual. Una manera de gestionar los usos del agua*. CUIDES.
- Willmott, C. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. En G. GL, *In Spatial Statistics and Models* (págs. 443-460). Boston: Willmott CJ (eds). D. Reidel.
- Xu, L., & Hsiao, T. (2004). Predicted versus measured photosynthetic water-use efficiency of crop stands under dynamically changing field environments. *J. Exp. Bot*, Issue 55. 2395-2411.
- Yara. (19 de 08 de 2014). *Nutrición vegetal*. Obtenido de Rendimiento de la Papa: <http://www.yara.com.co/crop-nutrition/crops/papa/rendimiento/>

ANEXOS

Anexo 1: Valores de proyección de datos

Los siguientes, fueron elaborados por el autor con datos generados por CPTEC/INPE, disponibles en la Plataforma PROJETA y corregidos en el enfoque de escala lineal (Lenderink et al., 2007), e históricos (2006-2021) proporcionados por SENAMHI.

Precipitación promedio mensual acumulada, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 4.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

PRECIPITACIÓN (mm) RCP 4.5					
	HISTORICA	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5	PROM PROY
ENE	120.07	132.03	16.47	104.85	84.45
FEB	103.60	85.11	19.26	64.20	56.19
MAR	92.71	87.60	29.33	69.47	62.14
ABR	41.02	43.94	27.87	27.30	33.04
MAY	9.32	5.94	15.90	2.46	8.10
JUN	2.54	4.47	15.53	4.06	8.02
JUL	3.03	2.06	16.30	2.41	6.92
AGO	5.98	10.58	32.24	8.63	17.15
SET	27.74	23.95	39.81	19.35	27.71
OCT	48.21	72.83	57.93	46.58	59.12
NOV	56.46	108.06	46.36	51.08	68.50
DIC	99.82	110.50	23.78	98.17	77.48

Precipitación promedio mensual acumulada, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 8.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

PRECIPITACIÓN (mm) RCP 8.5					
MES	HISTORICA	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5	PROM PROY
ENE	120.07	162.13	25.65	92.17	93.32
FEB	103.60	108.69	20.16	63.11	63.98
MAR	92.71	100.49	31.14	64.28	65.30
ABR	41.02	44.21	28.91	16.65	29.93
MAY	9.32	7.00	17.95	2.82	9.26
JUN	2.54	5.42	16.55	4.24	8.74
JUL	3.03	2.32	18.10	2.55	7.65
AGO	5.98	11.32	29.48	4.14	14.98
SET	27.74	25.96	41.76	17.82	28.51
OCT	48.21	73.00	57.84	35.20	55.35
NOV	56.46	97.18	42.78	31.14	57.04
DIC	99.82	105.94	28.09	107.31	80.45

Temperatura máxima promedio mensual, años proyectados 2023 – 2050
para la RCP 4.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

TEMPERATURA MÁXIMA (°C) RCP 4.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROY
ENE	16.6	17.3	17.1	17.0	17.1
FEB	16.4	17.5	17.2	17.3	17.3
MAR	16.7	17.5	17.8	17.7	17.7
ABR	16.8	17.9	18.1	17.6	17.9
MAY	16.8	18.3	18.1	17.5	18.0
JUN	16.7	18.0	16.8	17.3	17.4
JUL	16.6	18.1	17.0	16.8	17.3
AGO	17.7	18.3	17.4	17.3	17.7
SET	18.4	19.1	18.3	17.9	18.5
OCT	18.6	18.7	18.9	18.9	18.8
NOV	19.2	18.3	19.1	18.9	18.8
DIC	17.5	18.2	18.4	18.0	18.2

Temperatura máxima promedio mensual, años proyectados 2023 – 2050 para la
RCP 8.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

TEMPERATURA MÁXIMA (°C) RCP 8.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROY
ENE	16.6	17.2	18.1	17.3	17.5
FEB	16.4	17.2	18.3	17.8	17.8
MAR	16.7	17.4	18.5	17.9	18.0
ABR	16.8	17.9	18.9	18.1	18.3
MAY	16.8	18.3	18.3	17.6	18.1
JUN	16.7	18.1	17.3	17.2	17.5
JUL	16.6	18.1	17.3	17.2	17.5
AGO	17.7	18.5	17.8	17.6	17.9
SET	18.4	19.3	18.8	18.3	18.8
OCT	18.6	18.9	19.7	19.0	19.2
NOV	19.2	18.9	19.9	19.2	19.3
DIC	17.5	18.6	19.5	18.4	18.8

Temperatura mínima promedio mensual, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 4.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

TEMPERATURA MÍNIMA (°C) RCP 4.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROJ
ENE	4.9	6.5	5.9	6.1	6.2
FEB	5.0	6.4	6.0	6.0	6.2
MAR	4.3	6.0	5.7	5.5	5.7
ABR	2.5	5.2	4.9	4.3	4.8
MAY	-1.3	0.1	-0.1	-1.1	-0.4
JUN	-3.9	-2.5	-3.1	-3.5	-3.1
JUL	-4.2	-2.9	-3.2	-4.2	-3.5
AGO	-2.9	-1.5	-2.0	-2.5	-2.0
SET	0.5	1.9	1.0	0.7	1.2
OCT	2.5	4.3	3.6	3.8	3.9
NOV	3.5	4.9	4.3	4.2	4.4
DIC	4.5	6.0	5.2	5.5	5.5

Temperatura mínima promedio mensual, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 8.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

TEMPERATURA MÍNIMA (°C) RCP 8.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROJ
ENE	4.9	6.3	6.7	6.8	6.6
FEB	5.0	6.4	6.7	6.7	6.6
MAR	4.3	5.7	6.2	6.2	6.0
ABR	2.5	4.4	5.4	5.3	5.1
MAY	-1.3	-1.3	0.1	0.2	-0.3
JUN	-3.9	-3.8	-2.7	-2.3	-2.9
JUL	-4.2	-4.0	-3.0	-2.7	-3.3
AGO	-2.9	-2.5	-1.9	-1.2	-1.9
SET	0.5	0.6	1.5	2.1	1.4
OCT	2.5	3.8	4.0	4.5	4.1
NOV	3.5	4.0	5.0	5.3	4.8
DIC	4.5	5.7	5.9	6.3	6.0

Evapotranspiración promedio mensual acumulada, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 4.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm) RCP 4.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROY
ENE	111.8	116.0	116.5	115.5	116.0
FEB	107.8	103.5	103.4	103.8	103.6
MAR	104.8	109.5	111.5	111.4	110.8
ABR	96.6	97.2	98.6	97.6	97.8
MAY	96.2	104.5	103.6	102.1	103.4
JUN	94.1	99.1	94.8	97.4	97.1
JUL	97.5	106.6	102.1	102.4	103.7
AGO	112.1	118.4	114.7	115.0	116.0
SET	124.7	126.5	123.6	122.2	124.1
OCT	131.4	134.6	137.4	136.5	136.2
NOV	140.3	133.1	138.3	137.7	136.4
DIC	119.8	125.6	128.6	125.3	126.5

Evapotranspiración promedio mensual acumulada, años proyectados 2023 – 2050 para la RCP 8.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm) RCP 8.5					
MES	HISTORI CA	CANES M2	HADGE M2-ES	MIRO C 5	PRO M PROY
ENE	111.8	114.7	120.3	116.6	117.2
FEB	107.8	101.5	107.4	105.5	104.8
MAR	104.8	108.1	114.4	112.3	111.6
ABR	96.6	96.8	101.4	99.2	99.1
MAY	96.2	104.2	104.3	103.1	103.9
JUN	94.1	99.2	96.3	97.2	97.6
JUL	97.5	106.6	103.3	103.9	104.6
AGO	112.1	119.1	116.2	116.3	117.2
SET	124.7	127.1	125.6	123.9	125.5
OCT	131.4	135.1	140.8	137.2	137.7
NOV	140.3	135.4	142.1	139.4	139.0
DIC	119.8	127.3	133.7	127.4	129.5



Rendimiento de cultivo (Tn/Ha) en cada campaña, proyectados 2023 – 2050
para la RCP 4.5 y 8.5 para los modelos CANESM2, HADGEM2-ES, MIROC 5.

AÑO	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5	CANESM2	HADGEM2-ES	MIROC 5
2024	12.07	10.92	10.75	12.37	11.06	12.35
2025	11.52	9.08	11.30	11.90	9.21	11.83
2026	12.03	10.82	10.60	11.83	10.99	10.97
2027	11.86	10.77	12.38	12.08	10.96	11.65
2028	11.49	11.03	11.45	11.64	11.24	11.82
2029	11.59	10.73	10.67	11.51	10.96	12.34
2030	11.50	11.16	10.59	11.97	11.41	11.83
2031	11.68	10.36	10.70	11.86	10.62	10.41
2032	11.07	11.10	11.66	12.09	11.39	10.76
2033	11.25	11.22	11.82	11.77	11.54	11.62
2034	11.09	11.27	10.66	11.27	11.61	12.31
2035	10.83	11.08	9.64	11.33	11.45	11.68
2036	10.98	11.46	9.98	11.37	11.86	10.63
2037	11.02	10.98	10.85	11.67	11.39	10.63
2038	11.14	10.96	11.35	11.43	11.40	11.07
2039	10.52	10.94	10.98	11.17	11.40	11.58
2040	10.72	11.06	9.41	10.92	11.55	11.00
2041	10.92	10.97	9.62	11.34	11.48	10.86
2042	10.82	10.90	10.17	11.58	11.45	11.06
2043	9.99	11.02	11.12	10.73	11.60	11.68
2044	10.45	11.00	10.82	10.92	11.61	11.15
2045	9.86	10.87	9.82	11.08	11.51	10.38
2046	10.65	10.90	9.35	11.12	11.57	10.62
2047	10.59	10.75	9.39	11.15	11.45	10.96
2048	10.55	10.68	10.23	11.33	11.40	11.31
2049	10.14	10.53	10.59	10.85	11.27	11.17
2050	9.82	10.46	9.66	10.54	11.24	9.70



Anexo 2: Resultados de la caracterización climática de la zona en estudio

Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (1)

DIA	MES	AÑO	T (°C)		ETo (mm/día)	PP (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	1	2017	18.2	3.2	4.2	0.0
2	1	2017	14.4	5.0	3.4	0.0
3	1	2017	15.6	3.6	3.7	0.0
4	1	2017	18.6	3.4	4.4	1.6
5	1	2017	17.0	7.0	3.6	3.2
6	1	2017	18.2	6.2	4.0	6.3
7	1	2017	15.2	5.2	3.5	1.7
8	1	2017	16.4	6.2	3.6	7.6
9	1	2017	15.2	5.2	3.6	0.0
10	1	2017	17.0	5.6	3.7	2.3
11	1	2017	18.6	4.2	4.3	1.5
12	1	2017	17.6	6.2	3.9	0.0
13	1	2017	18.2	5.8	4.1	0.0
14	1	2017	18.0	6.3	3.9	0.9
15	1	2017	18.4	5.2	4.2	0.0
16	1	2017	17.8	5.4	4.1	0.3
17	1	2017	18.2	5.1	4.3	0.1
18	1	2017	17.0	4.2	4.0	0.7
19	1	2017	14.4	4.2	3.3	3.0
20	1	2017	15.0	1.0	3.9	0.0
21	1	2017	15.0	4.2	3.8	0.0
22	1	2017	15.2	3.2	3.8	0.0
23	1	2017	17.4	2.4	4.1	24.2
24	1	2017	17.8	4.6	4.1	5.5
25	1	2017	15.4	5.0	3.4	27.9
26	1	2017	15.4	3.6	3.6	3.2
27	1	2017	13.9	5.8	3.0	3.7
28	1	2017	16.0	4.8	3.5	0.0
29	1	2017	16.8	4.8	4.0	0.0
30	1	2017	18.4	3.0	4.4	0.0
31	1	2017	19.0	3.8	4.5	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (2).

DIA	MES	AÑO	T (°C)		ETo (mm/día)	PP (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	2	2017	19.8	3.4	4.7	0.7
2	2	2017	19.2	3.2	4.5	0.0
3	2	2017	20.8	4.2	4.9	0.0
4	2	2017	20.6	3.6	4.8	0.0
5	2	2017	22.0	3.0	5.2	1.2
6	2	2017	18.8	4.0	4.4	0.0
7	2	2017	18.0	4.2	4.2	0.0
8	2	2017	20.0	7.2	4.4	0.0
9	2	2017	20.0	4.0	4.7	0.3
10	2	2017	21.2	3.4	5.0	0.0
11	2	2017	19.8	6.0	4.5	0.1
12	2	2017	18.2	5.2	4.1	1.0
13	2	2017	16.8	4.9	3.9	0.5
14	2	2017	19.6	2.2	4.6	0.0
15	2	2017	18.2	2.2	4.5	0.0
16	2	2017	15.2	3.8	3.5	1.5
17	2	2017	17.8	6.2	3.9	0.3
18	2	2017	19.0	6.0	4.2	0.0
19	2	2017	16.2	6.2	3.5	1.8
20	2	2017	15.6	5.2	3.6	1.6
21	2	2017	15.8	5.9	3.4	4.6
22	2	2017	14.6	5.0	3.3	2.8
23	2	2017	12.4	4.6	2.7	4.5
24	2	2017	14.6	1.6	3.5	8.5
25	2	2017	13.8	4.2	3.1	2.8
26	2	2017	14.0	3.0	3.2	6.5
27	2	2017	15.8	5.2	3.4	0.4
28	2	2017	15.4	6.0	3.2	2.3



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (3)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)			ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA			
1	3	2017	16.0	4.0	3.2	14.4	
2	3	2017	17.8	5.2	3.5	1.2	
3	3	2017	15.8	4.2	3.9	0.2	
4	3	2017	16.2	6.9	3.4	56.6	
5	3	2017	16.0	4.2	3.4	3.5	
6	3	2017	15.3	4.1	3.5	2.9	
7	3	2017	15.6	5.0	3.2	0.0	
8	3	2017	15.2	4.0	3.4	2.1	
9	3	2017	16.8	4.4	3.3	0.0	
10	3	2017	17.0	5.6	3.6	3.9	
11	3	2017	12.2	4.2	3.5	0.0	
12	3	2017	17.2	3.2	2.8	2.4	
13	3	2017	14.0	4.8	3.8	0.0	
14	3	2017	16.2	3.6	3.0	0.0	
15	3	2017	17.2	6.0	3.6	7.7	
16	3	2017	13.2	5.6	3.5	12.4	
17	3	2017	16.0	5.2	2.7	0.0	
18	3	2017	17.4	2.0	3.4	0.0	
19	3	2017	17.2	3.2	3.8	0.0	
20	3	2017	17.2	1.8	3.7	0.0	
21	3	2017	18.0	3.8	3.9	0.0	
22	3	2017	16.4	6.4	3.8	0.2	
23	3	2017	16.8	5.8	3.3	2.4	
24	3	2017	16.4	6.0	3.4	1.1	
25	3	2017	17.0	4.8	3.3	2.4	
26	3	2017	15.2	7.0	3.5	0.0	
27	3	2017	16.8	1.8	3.0	0.0	
28	3	2017	17.0	7.0	3.6	1.5	
29	3	2017	13.2	6.6	3.3	1.6	
30	3	2017	15.8	6.2	2.5	1.6	
31	3	2017	15.4	6.8	3.0	0.1	



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (4)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)			ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA			
1	4	2017	16.0	5.6	3.2	0.0	
2	4	2017	17.2	5.8	3.3	1.0	
3	4	2017	18.4	3.5	3.6	3.6	
4	4	2017	16.8	6.0	3.2	0.0	
5	4	2017	17.6	3.0	3.5	0.0	
6	4	2017	16.0	5.0	3.2	9.9	
7	4	2017	17.8	5.2	3.4	0.0	
8	4	2017	15.4	6.0	3.0	0.2	
9	4	2017	16.6	7.0	3.0	0.4	
10	4	2017	17.2	4.2	3.3	2.6	
11	4	2017	15.0	6.0	2.8	0.0	
12	4	2017	16.2	5.2	3.0	5.3	
13	4	2017	16.4	5.8	3.1	0.0	
14	4	2017	17.4	1.6	3.4	0.0	
15	4	2017	17.8	0.8	3.5	0.0	
16	4	2017	17.2	3.4	3.3	0.0	
17	4	2017	15.2	5.6	2.8	0.0	
18	4	2017	17.2	4.6	3.2	0.0	
19	4	2017	17.8	4.4	3.4	0.0	
20	4	2017	17.0	-1.0	3.5	0.0	
21	4	2017	18.2	-0.2	3.6	0.0	
22	4	2017	17.4	1.4	2.9	0.0	
23	4	2017	16.8	3.0	3.1	0.0	
24	4	2017	17.4	4.2	3.2	4.4	
25	4	2017	16.0	2.8	3.0	0.0	
26	4	2017	17.8	0.4	3.4	0.3	
27	4	2017	15.8	2.8	2.9	1.4	
28	4	2017	15.2	4.0	2.7	3.5	
29	4	2017	14.4	3.8	2.6	2.8	
30	4	2017	16.6	4.8	2.9	0.0	



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (5)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	5	2017	15.8	5.0	2.9	0.2
2	5	2017	16.8	2.8	3.1	0.0
3	5	2017	17.6	0.8	3.3	0.0
4	5	2017	17.4	3.0	2.8	0.0
5	5	2017	17.0	0.6	3.2	0.0
6	5	2017	17.6	1.6	3.2	0.2
7	5	2017	15.8	5.8	2.7	0.9
8	5	2017	16.8	1.0	3.1	0.0
9	5	2017	16.0	0.8	3.0	0.0
10	5	2017	16.8	4.6	2.8	0.2
11	5	2017	17.8	3.2	3.1	0.0
12	5	2017	18.6	0.8	3.4	0.0
13	5	2017	17.8	-0.4	3.2	0.0
14	5	2017	18.6	1.0	3.4	0.0
15	5	2017	17.4	1.2	2.9	5.8
16	5	2017	15.8	4.8	2.7	0.3
17	5	2017	16.8	2.8	3.0	0.0
18	5	2017	17.2	0.2	3.1	0.0
19	5	2017	17.6	-2.2	3.4	0.0
20	5	2017	17.6	-1.2	3.3	0.0
21	5	2017	17.2	1.8	3.1	6.8
22	5	2017	14.8	4.0	2.4	7.3
23	5	2017	14.8	4.6	2.4	3.3
24	5	2017	13.0	3.6	2.1	1.0
25	5	2017	15.0	2.8	2.4	0.0
26	5	2017	15.2	1.0	2.6	0.0
27	5	2017	16.8	0.8	2.7	1.9
28	5	2017	15.8	4.9	2.5	0.0
29	5	2017	15.4	5.2	2.3	5.8
30	5	2017	10.2	4.6	1.6	5.6
31	5	2017	16.2	-0.6	2.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (6).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	6	2017	15.4	-1.2	2.8	0.0
2	6	2017	16.6	-1.0	2.9	0.0
3	6	2017	16.4	0.6	2.8	0.4
4	6	2017	16.8	-0.4	2.9	0.0
5	6	2017	16.2	-0.4	2.9	0.0
6	6	2017	15.8	-1.2	2.8	0.0
7	6	2017	17.0	5.0	2.8	0.0
8	6	2017	15.4	-2.6	2.9	0.0
9	6	2017	13.2	-3.0	2.4	1.7
10	6	2017	11.6	1.4	2.0	3.8
11	6	2017	11.8	2.2	2.1	0.2
12	6	2017	15.2	-1.2	2.6	0.0
13	6	2017	14.8	-1.4	2.6	0.0
14	6	2017	15.4	-1.8	2.7	0.0
15	6	2017	15.6	-2.0	2.8	0.0
16	6	2017	16.0	-1.8	2.9	0.0
17	6	2017	16.8	-2.0	2.9	0.0
18	6	2017	15.8	-2.2	2.8	0.0
19	6	2017	14.8	-3.0	2.7	0.0
20	6	2017	15.8	-2.4	2.8	0.0
21	6	2017	16.8	-3.0	2.8	0.0
22	6	2017	13.6	-3.2	2.6	0.0
23	6	2017	16.4	-5.8	3.0	0.0
24	6	2017	17.0	-4.4	3.1	0.0
25	6	2017	16.6	-3.0	2.9	0.0
26	6	2017	17.4	-2.8	3.0	0.0
27	6	2017	17.8	-2.8	3.1	0.0
28	6	2017	18.0	-1.4	3.1	0.0
29	6	2017	16.8	-3.6	3.0	0.0
30	6	2017	17.6	-2.0	3.0	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (7).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	7	2017	16.8	0.0	2.9	7.0
2	7	2017	14.8	1.6	2.4	0.3
3	7	2017	15.0	-1.1	2.6	0.0
4	7	2017	15.9	-2.2	2.9	0.0
5	7	2017	16.0	-4.2	3.0	0.0
6	7	2017	16.6	-3.6	3.0	0.0
7	7	2017	16.6	-2.6	3.0	0.0
8	7	2017	15.8	-4.0	2.9	0.0
9	7	2017	15.8	-4.6	2.9	0.0
10	7	2017	15.8	-6.4	3.1	0.0
11	7	2017	16.2	-6.2	3.1	0.0
12	7	2017	17.2	-5.8	3.3	0.0
13	7	2017	18.0	-5.6	3.6	0.0
14	7	2017	17.8	-4.8	3.5	0.0
15	7	2017	17.8	-4.2	3.4	0.0
16	7	2017	19.2	-4.0	3.5	0.0
17	7	2017	18.0	-1.8	3.3	0.0
18	7	2017	18.4	-2.0	3.3	0.0
19	7	2017	18.2	-3.8	3.4	0.0
20	7	2017	19.6	-4.8	3.8	0.0
21	7	2017	19.2	-4.8	3.5	0.0
22	7	2017	19.0	-4.2	3.7	0.0
23	7	2017	18.0	-4.2	3.4	0.0
24	7	2017	18.8	-5.2	3.5	0.0
25	7	2017	17.6	-5.4	3.5	0.0
26	7	2017	16.6	-5.4	3.2	0.0
27	7	2017	16.0	-5.6	3.2	0.0
28	7	2017	16.0	-4.4	3.1	0.0
29	7	2017	17.2	-5.1	3.3	0.0
30	7	2017	17.8	-5.0	3.4	0.0
31	7	2017	18.4	-4.8	3.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (8).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	8	2017	18.0	-4.2	3.5	0.0
2	8	2017	20.0	-3.0	3.8	0.0
3	8	2017	20.2	-4.8	3.9	0.0
4	8	2017	19.0	-4.2	3.7	0.0
5	8	2017	19.4	-3.2	3.7	0.0
6	8	2017	19.8	-3.6	3.8	0.0
7	8	2017	18.8	-4.0	3.8	0.0
8	8	2017	19.8	-3.6	3.8	0.0
9	8	2017	16.4	0.2	3.2	0.0
10	8	2017	16.2	-1.6	3.3	0.0
11	8	2017	17.0	-2.8	3.5	0.0
12	8	2017	16.6	-6.2	3.6	0.0
13	8	2017	17.4	-7.2	3.7	0.0
14	8	2017	17.8	-4.2	3.6	0.0
15	8	2017	17.2	-1.8	3.4	0.0
16	8	2017	18.4	-3.2	3.7	0.0
17	8	2017	15.4	0.6	3.1	0.0
18	8	2017	16.0	3.4	3.1	0.0
19	8	2017	15.6	-7.2	3.5	0.0
20	8	2017	17.2	-6.8	3.7	0.0
21	8	2017	17.8	-4.0	3.7	0.0
22	8	2017	18.4	-2.8	3.6	0.0
23	8	2017	18.8	-4.8	4.0	0.0
24	8	2017	19.2	-2.4	3.9	0.0
25	8	2017	19.2	-2.2	3.9	0.0
26	8	2017	20.0	1.8	3.9	0.0
27	8	2017	20.0	0.4	4.1	0.0
28	8	2017	19.8	0.2	4.1	0.0
29	8	2017	19.8	-0.4	4.1	0.0
30	8	2017	18.2	-2.8	3.9	0.0
31	8	2017	18.8	-1.4	3.9	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (9).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	9	2017	20.0	0.2	4.1	0.0
2	9	2017	20.0	-1.2	4.2	0.0
3	9	2017	19.0	-1.0	4.1	0.0
4	9	2017	19.6	0.4	4.1	0.0
5	9	2017	18.2	3.4	3.8	0.0
6	9	2017	20.6	4.4	4.0	3.9
7	9	2017	16.4	2.2	3.4	4.9
8	9	2017	14.4	2.0	3.2	1.0
9	9	2017	18.0	3.4	3.8	0.0
10	9	2017	19.8	0.6	4.2	0.0
11	9	2017	14.6	0.2	3.2	4.6
12	9	2017	11.0	1.2	2.2	3.3
13	9	2017	17.8	3.4	3.6	6.8
14	9	2017	17.0	2.8	3.6	0.0
15	9	2017	14.2	5.0	2.7	6.2
16	9	2017	16.2	5.8	3.1	13.1
17	9	2017	13.0	4.2	2.7	1.8
18	9	2017	16.8	4.6	3.3	0.0
19	9	2017	18.4	3.0	4.0	0.0
20	9	2017	20.8	1.8	4.5	0.0
21	9	2017	20.6	3.4	4.4	0.0
22	9	2017	19.4	5.0	4.0	2.8
23	9	2017	17.2	6.2	3.4	10.0
24	9	2017	16.6	4.2	3.6	0.2
25	9	2017	17.0	2.6	3.7	1.3
26	9	2017	17.8	4.8	3.8	5.1
27	9	2017	15.0	4.6	3.1	1.0
28	9	2017	16.8	3.6	3.9	0.0
29	9	2017	16.8	-2.2	4.2	0.0
30	9	2017	18.8	-1.0	4.4	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (10).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	10	2017	19.0	-0.2	4.5	0.0
2	10	2017	15.8	-5.4	4.2	0.0
3	10	2017	18.4	-5.8	4.7	0.0
4	10	2017	19.0	-2.4	4.8	0.0
5	10	2017	20.0	-1.0	4.9	0.0
6	10	2017	20.8	0.0	4.9	0.0
7	10	2017	20.2	0.6	4.7	0.0
8	10	2017	19.2	1.4	4.5	0.0
9	10	2017	20.8	0.4	4.9	0.0
10	10	2017	20.0	1.0	4.7	0.0
11	10	2017	19.2	2.2	4.5	2.7
12	10	2017	19.0	5.6	4.1	1.1
13	10	2017	16.0	5.8	3.6	5.5
14	10	2017	15.2	4.8	3.4	4.9
15	10	2017	11.2	2.8	2.7	8.3
16	10	2017	14.5	4.0	3.2	1.0
17	10	2017	17.0	5.2	3.7	4.1
18	10	2017	16.4	2.0	3.8	0.1
19	10	2017	18.4	1.4	4.3	0.6
20	10	2017	18.8	3.2	4.4	0.0
21	10	2017	17.8	2.1	4.4	0.0
22	10	2017	19.6	3.2	4.6	0.0
23	10	2017	17.8	5.6	4.1	0.0
24	10	2017	19.6	2.8	4.6	0.0
25	10	2017	20.2	2.4	4.8	4.5
26	10	2017	19.2	2.6	4.5	0.2
27	10	2017	19.4	2.8	4.6	0.4
28	10	2017	20.2	2.8	4.8	0.0
29	10	2017	19.4	2.8	4.7	0.0
30	10	2017	20.0	2.6	4.9	0.0
31	10	2017	20.2	2.5	5.0	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 – 2020 –

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (11).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	11	2017	17.8	5.2	4.2	0.0
2	11	2017	21.6	1.8	5.2	0.0
3	11	2017	21.2	3.2	4.9	2.5
4	11	2017	20.8	4.2	4.8	0.7
5	11	2017	19.2	3.2	4.5	0.8
6	11	2017	19.4	3.8	4.5	6.4
7	11	2017	17.8	5.4	4.1	0.0
8	11	2017	19.8	3.2	4.7	0.0
9	11	2017	18.8	4.0	4.4	0.0
10	11	2017	19.4	4.4	4.6	0.0
11	11	2017	17.8	0.8	4.5	3.7
12	11	2017	13.6	4.8	3.0	4.7
13	11	2017	17.8	5.0	4.1	0.0
14	11	2017	20.0	2.8	4.8	0.0
15	11	2017	20.8	6.5	4.7	3.8
16	11	2017	19.0	5.4	4.4	0.0
17	11	2017	19.8	2.8	4.8	0.0
18	11	2017	20.6	3.8	4.8	0.0
19	11	2017	19.4	3.0	4.8	0.0
20	11	2017	20.0	0.2	5.1	0.0
21	11	2017	20.0	-0.2	5.1	0.0
22	11	2017	20.0	1.2	5.1	0.0
23	11	2017	20.2	2.4	5.0	0.0
24	11	2017	22.0	1.8	5.4	0.0
25	11	2017	22.4	2.2	5.5	0.0
26	11	2017	21.4	2.8	5.3	0.0
27	11	2017	20.2	5.2	4.8	0.0
28	11	2017	20.0	5.4	4.7	2.2
29	11	2017	18.0	5.6	4.2	0.0
30	11	2017	21.2	6.0	4.9	1.4



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (12).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	12	2017	20.2	4.0	4.9	0.0
2	12	2017	21.0	0.8	5.3	0.0
3	12	2017	18.4	7.2	4.3	0.0
4	12	2017	17.0	5.4	4.1	6.4
5	12	2017	16.0	5.0	3.7	4.5
6	12	2017	18.4	5.0	4.3	0.0
7	12	2017	18.4	5.8	4.2	4.8
8	12	2017	17.8	6.6	4.0	2.0
9	12	2017	19.4	5.0	4.5	0.0
10	12	2017	20.0	3.2	4.9	0.0
11	12	2017	19.8	4.4	4.8	0.0
12	12	2017	19.8	4.8	4.8	0.0
13	12	2017	20.2	2.6	5.0	0.0
14	12	2017	19.0	0.8	4.8	0.0
15	12	2017	20.2	5.0	4.9	0.0
16	12	2017	20.2	3.2	5.0	0.0
17	12	2017	15.4	8.2	3.3	2.7
18	12	2017	14.6	2.4	3.6	0.2
19	12	2017	18.6	4.5	4.4	0.0
20	12	2017	20.0	4.0	4.7	0.0
21	12	2017	16.8	6.2	3.8	2.1
22	12	2017	18.6	5.8	4.2	2.5
23	12	2017	18.0	5.2	4.3	0.0
24	12	2017	18.8	6.0	4.3	0.0
25	12	2017	16.4	4.8	3.9	0.0
26	12	2017	16.6	5.6	3.7	0.6
27	12	2017	15.6	7.0	3.3	7.4
28	12	2017	17.8	6.8	3.9	2.0
29	12	2017	15.2	4.9	3.7	6.5
30	12	2017	14.8	4.6	3.5	0.0
31	12	2017	18.2	5.8	4.1	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (13).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	1	2018	18.4	5.4	4.2	4.5
2	1	2018	17.2	5.8	3.9	0.1
3	1	2018	15.2	5.2	3.7	0.0
4	1	2018	16.0	6.4	3.6	4.8
5	1	2018	20.2	2.2	4.8	0.2
6	1	2018	17.2	5.8	3.8	0.9
7	1	2018	16.6	5.4	3.9	2.2
8	1	2018	16.2	6.2	3.6	3.2
9	1	2018	17.4	4.8	4.1	12.3
10	1	2018	16.2	3.6	3.9	0.0
11	1	2018	14.8	4.8	3.4	4.3
12	1	2018	14.2	5.4	3.2	15.3
13	1	2018	16.0	5.6	3.7	0.8
14	1	2018	17.4	5.2	4.0	2.3
15	1	2018	13.2	5.6	2.9	8.5
16	1	2018	16.0	5.2	3.7	2.7
17	1	2018	16.4	5.6	3.7	1.3
18	1	2018	14.0	6.4	3.1	0.0
19	1	2018	15.8	4.4	3.7	3.4
20	1	2018	16.4	5.0	3.8	15.8
21	1	2018	14.0	5.0	3.2	6.5
22	1	2018	15.8	3.4	3.7	0.9
23	1	2018	16.4	3.8	4.0	2.4
24	1	2018	16.4	5.6	3.8	1.3
25	1	2018	17.4	6.0	3.9	6.1
26	1	2018	17.6	4.2	4.1	0.8
27	1	2018	18.0	2.4	4.4	0.0
28	1	2018	17.4	6.4	4.0	0.0
29	1	2018	12.8	7.0	2.9	0.0
30	1	2018	17.8	4.8	4.2	0.0
31	1	2018	16.8	6.2	3.8	4.4



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (14).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	2	2018	16.4	7.2	3.5	5.6
2	2	2018	12.4	5.0	2.8	0.9
3	2	2018	16.8	6.2	3.8	0.7
4	2	2018	15.8	7.0	3.4	3.9
5	2	2018	18.4	7.0	4.1	0.0
6	2	2018	17.6	8.2	3.6	5.3
7	2	2018	18.0	6.4	4.2	6.9
8	2	2018	16.2	4.2	3.7	5.7
9	2	2018	14.2	6.8	3.1	0.7
10	2	2018	14.8	6.2	3.1	9.1
11	2	2018	12.4	5.2	2.8	3.4
12	2	2018	16.2	7.2	3.5	0.7
13	2	2018	15.4	6.4	3.3	0.6
14	2	2018	14.0	7.4	2.9	5.2
15	2	2018	17.2	5.0	3.9	6.8
16	2	2018	16.2	6.0	3.6	13.6
17	2	2018	16.0	5.0	3.5	2.3
18	2	2018	17.4	4.8	3.9	0.0
19	2	2018	17.8	5.0	4.0	0.0
20	2	2018	18.0	4.0	4.1	7.3
21	2	2018	16.6	3.2	3.8	2.1
22	2	2018	10.6	5.4	2.3	12.7
23	2	2018	15.8	3.8	3.5	0.6
24	2	2018	15.0	5.2	3.4	0.2
25	2	2018	16.0	5.0	3.5	0.0
26	2	2018	15.8	4.2	3.5	1.9
27	2	2018	18.4	5.0	4.1	6.1
28	2	2018	16.8	3.8	3.8	0.3



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (15)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	3	2018	16.4	4.6	3.6	4.4
2	3	2018	14.8	5.8	3.1	3.7
3	3	2018	16.8	6.2	3.5	6.8
4	3	2018	17.6	5.6	3.7	4.4
5	3	2018	16.8	5.8	3.6	17.8
6	3	2018	15.8	5.4	3.3	15.0
7	3	2018	12.6	0.8	3.0	10.2
8	3	2018	15.2	5.2	3.2	11.6
9	3	2018	16.4	6.2	3.4	6.7
10	3	2018	16.8	7.0	3.4	0.0
11	3	2018	17.0	6.4	3.5	0.0
12	3	2018	17.8	6.0	3.7	10.7
13	3	2018	15.8	5.4	3.3	3.0
14	3	2018	15.2	6.0	3.1	17.4
15	3	2018	16.6	4.9	3.5	0.1
16	3	2018	13.8	7.8	2.6	4.4
17	3	2018	14.8	6.8	2.8	4.0
18	3	2018	16.6	7.6	3.2	0.0
19	3	2018	14.0	4.0	2.6	6.9
20	3	2018	15.4	5.0	3.2	8.9
21	3	2018	14.4	6.0	2.8	13.2
22	3	2018	18.0	4.3	3.8	0.0
23	3	2018	15.4	4.2	3.2	0.0
24	3	2018	17.4	4.0	3.6	0.0
25	3	2018	16.4	5.0	3.4	0.0
26	3	2018	16.2	7.2	3.1	0.0
27	3	2018	18.2	2.4	3.8	0.0
28	3	2018	17.0	6.0	3.4	0.1
29	3	2018	16.2	2.8	3.5	0.0
30	3	2018	15.2	4.2	3.1	0.0
31	3	2018	15.6	3.2	3.3	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (16).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	4	2018	17.2	2.0	3.7	0.0
2	4	2018	17.6	1.4	3.7	0.0
3	4	2018	18.0	4.2	3.5	0.0
4	4	2018	17.6	4.2	3.5	0.0
5	4	2018	17.6	2.0	3.6	0.0
6	4	2018	15.8	1.6	3.3	0.0
7	4	2018	18.2	1.2	3.6	0.0
8	4	2018	16.2	1.2	3.3	0.0
9	4	2018	16.0	0.4	3.3	2.7
10	4	2018	17.4	3.8	3.4	0.0
11	4	2018	17.0	0.4	3.5	0.0
12	4	2018	18.2	-0.4	3.8	0.0
13	4	2018	13.0	0.2	2.8	0.0
14	4	2018	16.4	2.0	3.3	0.0
15	4	2018	17.4	-2.0	3.7	0.0
16	4	2018	17.0	-3.2	3.7	0.0
17	4	2018	17.6	1.6	3.6	0.0
18	4	2018	16.2	0.2	3.4	0.0
19	4	2018	18.0	0.0	3.7	0.0
20	4	2018	17.4	-0.6	3.6	0.0
21	4	2018	17.2	-1.2	3.6	0.0
22	4	2018	18.4	1.8	3.4	2.2
23	4	2018	16.2	4.4	3.0	0.0
24	4	2018	15.0	4.0	2.7	0.3
25	4	2018	16.0	4.6	2.9	0.0
26	4	2018	15.2	4.8	2.7	0.9
27	4	2018	17.4	2.2	3.2	1.8
28	4	2018	15.4	2.8	2.8	16.3
29	4	2018	15.2	3.0	2.7	0.0
30	4	2018	17.0	0.0	3.2	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (17)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	5	2018	16.8	0.8	3.2	0.1
2	5	2018	18.0	1.4	3.3	0.0
3	5	2018	17.4	1.8	3.1	0.0
4	5	2018	16.8	2.2	3.1	1.2
5	5	2018	16.2	4.2	2.7	4.2
6	5	2018	16.0	-0.2	2.9	0.0
7	5	2018	16.6	2.9	2.8	0.0
8	5	2018	17.0	0.2	3.1	0.0
9	5	2018	17.4	0.0	3.2	0.0
10	5	2018	18.0	2.8	3.1	0.0
11	5	2018	18.2	-0.8	3.4	0.6
12	5	2018	16.8	-0.4	3.2	0.0
13	5	2018	17.4	-1.2	3.3	0.0
14	5	2018	17.2	-6.6	3.4	0.0
15	5	2018	17.0	-5.0	3.3	0.0
16	5	2018	16.6	-4.6	3.3	0.0
17	5	2018	17.2	-3.2	3.2	0.0
18	5	2018	16.8	-4.8	3.2	0.0
19	5	2018	17.4	-6.6	3.3	0.0
20	5	2018	17.2	-1.8	3.1	0.0
21	5	2018	17.0	-3.9	3.1	0.0
22	5	2018	17.4	-2.6	3.1	0.0
23	5	2018	16.9	-1.2	3.1	0.0
24	5	2018	17.8	-2.0	3.2	0.0
25	5	2018	17.2	-3.1	3.2	0.0
26	5	2018	17.4	-1.8	3.1	0.0
27	5	2018	18.4	-2.2	3.2	0.0
28	5	2018	17.8	-2.4	3.2	0.0
29	5	2018	17.2	-4.6	3.2	0.0
30	5	2018	17.2	-5.6	3.3	0.0
31	5	2018	17.0	-7.0	3.2	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (18)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	6	2018	17.8	-6.6	3.3	0.0
2	6	2018	17.6	-4.2	3.1	10.9
3	6	2018	7.2	3.0	1.3	9.4
4	6	2018	15.0	3.6	2.5	0.0
5	6	2018	15.2	-1.0	2.6	0.0
6	6	2018	14.6	-1.2	2.6	0.0
7	6	2018	15.0	-2.4	2.7	0.0
8	6	2018	15.4	-2.6	2.9	0.0
9	6	2018	13.2	-3.0	2.4	1.7
10	6	2018	11.6	1.4	2.0	3.8
11	6	2018	11.8	2.2	2.1	0.2
12	6	2018	15.2	-1.2	2.6	0.0
13	6	2018	14.8	-1.4	2.6	0.0
14	6	2018	15.4	-1.8	2.7	0.0
15	6	2018	15.6	-2.0	2.8	0.0
16	6	2018	16.0	-1.8	2.9	0.0
17	6	2018	16.8	-2.0	2.9	0.0
18	6	2018	15.8	-2.2	2.8	0.0
19	6	2018	14.8	-3.0	2.7	0.0
20	6	2018	15.8	-2.4	2.8	0.0
21	6	2018	16.8	-3.0	2.8	0.0
22	6	2018	13.6	-3.2	2.6	0.0
23	6	2018	16.4	-5.8	3.0	0.0
24	6	2018	17.0	-4.4	3.1	0.0
25	6	2018	16.6	-3.0	2.9	0.0
26	6	2018	17.4	-2.8	3.0	0.0
27	6	2018	17.8	-2.8	3.1	0.0
28	6	2018	18.0	-1.4	3.1	0.0
29	6	2018	16.8	-3.6	3.0	0.0
30	6	2018	17.6	-2.0	3.0	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (19)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	7	2018	17.8	-3.2	3.1	0.0
2	7	2018	18.4	-4.4	3.2	0.0
3	7	2018	16.0	-6.0	3.0	0.0
4	7	2018	16.8	-5.0	3.1	0.0
5	7	2018	17.8	-4.2	3.2	0.0
6	7	2018	18.4	-3.0	3.2	0.0
7	7	2018	18.0	-7.0	3.3	0.0
8	7	2018	18.0	-7.2	3.4	0.0
9	7	2018	17.2	-3.2	3.1	0.0
10	7	2018	16.2	-1.4	2.7	0.3
11	7	2018	17.6	0.8	2.9	0.0
12	7	2018	16.4	-1.8	2.9	0.0
13	7	2018	15.2	-1.0	2.7	0.0
14	7	2018	13.6	-3.2	2.6	0.0
15	7	2018	15.6	-3.0	2.9	0.0
16	7	2018	15.2	-2.8	2.9	0.0
17	7	2018	17.0	-4.6	3.2	0.0
18	7	2018	16.8	-1.0	3.1	0.0
19	7	2018	15.8	-0.2	2.8	2.2
20	7	2018	12.0	-0.2	2.2	2.5
21	7	2018	3.4	2.0	0.9	14.7
22	7	2018	10.8	0.2	2.0	2.4
23	7	2018	13.0	-2.0	2.5	0.0
24	7	2018	16.6	-2.2	3.0	0.0
25	7	2018	16.2	-2.4	3.0	0.0
26	7	2018	16.0	-2.8	3.2	0.0
27	7	2018	16.4	-4.0	3.2	0.0
28	7	2018	17.8	-3.4	3.3	0.0
29	7	2018	18.2	-2.6	3.3	0.0
30	7	2018	17.2	-3.2	3.2	0.0
31	7	2018	17.0	-3.8	3.3	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (20).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	8	2018	17.0	-0.8	3.1	0.0
2	8	2018	18.6	0.6	3.4	0.3
3	8	2018	15.0	0.2	2.8	0.0
4	8	2018	17.8	-1.2	3.4	0.0
5	8	2018	16.0	0.2	3.1	0.0
6	8	2018	15.0	-0.6	2.9	0.1
7	8	2018	9.8	0.2	2.1	5.2
8	8	2018	14.8	-1.8	3.0	0.0
9	8	2018	16.2	1.4	3.0	0.0
10	8	2018	16.6	-1.2	3.2	0.0
11	8	2018	16.0	-0.8	3.0	0.6
12	8	2018	15.8	0.8	2.9	0.4
13	8	2018	15.2	-0.2	2.9	0.0
14	8	2018	15.4	-3.6	3.2	0.0
15	8	2018	17.0	-2.2	3.5	0.0
16	8	2018	16.4	1.4	3.3	0.0
17	8	2018	17.2	-0.6	3.5	0.0
18	8	2018	17.0	-1.6	3.5	0.0
19	8	2018	17.0	-1.2	3.5	0.0
20	8	2018	16.6	1.4	3.4	0.0
21	8	2018	16.4	4.0	3.2	0.0
22	8	2018	17.8	0.8	3.7	0.0
23	8	2018	17.2	-3.4	3.8	0.0
24	8	2018	17.4	-6.0	3.8	0.0
25	8	2018	18.2	-3.2	3.9	0.0
26	8	2018	17.0	2.9	3.4	0.4
27	8	2018	16.0	0.4	3.3	0.5
28	8	2018	17.6	0.8	3.6	0.0
29	8	2018	18.0	3.2	3.6	0.0
30	8	2018	17.0	1.4	3.7	0.0
31	8	2018	17.6	1.8	3.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (21)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	9	2018	18.0	1.6	3.9	0.0
2	9	2018	16.2	-7.0	3.9	0.0
3	9	2018	17.0	-4.1	3.9	0.0
4	9	2018	18.2	-2.4	4.0	0.0
5	9	2018	18.0	-1.2	4.1	0.0
6	9	2018	18.6	-2.0	4.2	0.0
7	9	2018	19.0	-1.0	4.2	0.0
8	9	2018	18.4	-0.2	4.0	3.5
9	9	2018	17.8	1.4	3.8	0.0
10	9	2018	17.8	1.4	3.8	0.0
11	9	2018	18.2	0.2	4.0	0.0
12	9	2018	18.2	-0.4	4.1	0.0
13	9	2018	19.2	-0.4	4.2	0.0
14	9	2018	19.2	-1.2	4.3	0.0
15	9	2018	19.0	4.0	3.9	0.6
16	9	2018	18.0	4.0	3.9	0.0
17	9	2018	18.8	2.2	4.2	0.0
18	9	2018	18.8	-3.4	4.5	0.0
19	9	2018	19.2	-3.2	4.6	0.0
20	9	2018	20.4	-2.2	4.8	0.0
21	9	2018	20.8	-0.4	4.9	0.0
22	9	2018	18.2	1.0	4.2	0.0
23	9	2018	19.0	1.2	4.3	0.2
24	9	2018	17.2	1.0	3.9	0.0
25	9	2018	17.9	3.8	4.0	0.0
26	9	2018	17.4	4.2	3.9	0.0
27	9	2018	17.9	3.6	4.0	0.3
28	9	2018	18.8	3.0	4.0	0.0
29	9	2018	18.4	-0.4	4.3	0.0
30	9	2018	20.2	-1.8	4.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (22)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	10	2018	21.6	0.0	4.5	0.0
2	10	2018	20.8	-0.2	4.9	0.0
3	10	2018	20.4	1.2	4.7	0.0
4	10	2018	15.4	0.8	3.7	0.0
5	10	2018	18.2	2.6	4.1	4.5
6	10	2018	17.2	4.2	3.7	1.4
7	10	2018	15.6	5.1	3.3	7.8
8	10	2018	16.4	3.6	3.8	0.0
9	10	2018	19.2	3.2	4.3	0.0
10	10	2018	20.2	3.4	4.4	1.4
11	10	2018	16.4	6.0	3.5	5.1
12	10	2018	15.0	5.0	3.2	1.3
13	10	2018	15.8	4.0	3.6	0.0
14	10	2018	19.4	3.6	4.3	0.5
15	10	2018	15.2	5.8	3.2	13.6
16	10	2018	17.2	5.2	3.7	5.6
17	10	2018	18.0	3.8	4.1	0.6
18	10	2018	16.4	4.9	3.4	5.2
19	10	2018	18.2	4.4	4.1	1.2
20	10	2018	14.4	6.0	3.1	1.8
21	10	2018	18.2	1.5	4.2	0.3
22	10	2018	19.4	2.6	4.5	3.5
23	10	2018	17.2	6.6	3.7	1.6
24	10	2018	15.0	5.6	3.3	7.9
25	10	2018	14.8	5.1	3.2	0.0
26	10	2018	16.2	5.4	3.6	0.7
27	10	2018	18.2	5.8	3.9	2.3
28	10	2018	18.8	5.2	4.3	0.0
29	10	2018	19.4	3.0	5.2	0.0
30	10	2018	19.8	2.8	4.6	0.0
31	10	2018	18.6	6.0	4.2	1.9



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (23)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	11	2018	19.0	3.7	4.6	7.5
2	11	2018	16.2	6.0	3.3	3.8
3	11	2018	19.0	3.4	4.5	0.6
4	11	2018	18.2	2.8	4.2	0.3
5	11	2018	17.4	4.9	4.0	3.0
6	11	2018	18.2	6.0	4.0	0.0
7	11	2018	19.8	4.2	4.4	0.7
8	11	2018	19.0	6.2	4.3	0.0
9	11	2018	19.8	4.2	4.6	0.0
10	11	2018	21.8	3.8	5.0	0.0
11	11	2018	21.6	5.4	5.0	0.0
12	11	2018	16.8	7.0	3.8	0.0
13	11	2018	20.4	4.0	4.8	0.0
14	11	2018	18.8	5.8	4.4	0.0
15	11	2018	20.0	6.8	4.5	24.2
16	11	2018	20.6	5.8	4.6	0.0
17	11	2018	20.0	3.2	4.8	0.0
18	11	2018	19.2	5.4	4.4	2.8
19	11	2018	18.4	6.8	3.8	9.7
20	11	2018	19.8	5.2	4.4	0.5
21	11	2018	20.8	3.8	4.7	1.5
22	11	2018	21.4	5.6	4.9	0.0
23	11	2018	21.4	3.4	5.1	0.0
24	11	2018	14.2	3.8	3.7	0.0
25	11	2018	21.2	2.8	5.1	0.4
26	11	2018	18.6	7.0	4.0	13.6
27	11	2018	16.6	5.2	3.8	1.5
28	11	2018	17.4	5.4	4.0	3.4
29	11	2018	18.6	5.0	4.4	0.0
30	11	2018	18.8	6.0	4.5	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (24)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	12	2018	19.4	1.8	4.9	0.0
2	12	2018	14.4	5.2	3.6	0.0
3	12	2018	20.6	2.4	5.0	0.0
4	12	2018	20.6	0.8	5.2	0.0
5	12	2018	21.2	0.2	5.4	0.0
6	12	2018	18.4	5.4	4.4	2.1
7	12	2018	19.8	2.8	4.6	10.5
8	12	2018	17.8	5.0	4.3	0.0
9	12	2018	21.4	0.8	5.3	0.0
10	12	2018	21.4	-2.2	5.6	2.2
11	12	2018	20.6	3.0	5.1	0.3
12	12	2018	21.8	0.8	5.4	0.0
13	12	2018	19.0	1.6	4.8	0.9
14	12	2018	20.0	5.2	4.7	1.4
15	12	2018	17.2	6.6	3.8	4.2
16	12	2018	19.8	6.0	4.5	0.5
17	12	2018	16.8	5.0	3.7	5.8
18	12	2018	15.0	5.6	3.4	4.7
19	12	2018	16.8	5.6	3.9	17.9
20	12	2018	16.0	3.2	4.0	0.3
21	12	2018	15.4	8.2	3.2	6.3
22	12	2018	17.0	3.8	4.1	0.0
23	12	2018	19.8	5.4	4.5	2.8
24	12	2018	17.8	6.0	4.2	0.0
25	12	2018	18.4	5.0	4.3	0.3
26	12	2018	15.8	6.4	4.1	5.0
27	12	2018	16.8	5.6	3.9	0.0
28	12	2018	18.0	5.6	4.1	0.2
29	12	2018	17.2	6.2	3.9	0.3
30	12	2018	16.6	4.2	4.2	0.0
31	12	2018	17.0	6.4	3.6	3.2

Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (25)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	1	2019	18.0	4.0	4.2	0.2
2	1	2019	19.8	3.6	4.6	34.7
3	1	2019	17.4	4.0	4.0	11.5
4	1	2019	15.2	6.2	3.4	5.1
5	1	2019	17.2	6.8	3.7	0.5
6	1	2019	18.2	8.0	4.1	0.0
7	1	2019	18.8	5.0	4.4	0.0
8	1	2019	19.2	4.6	4.5	0.0
9	1	2019	19.2	4.6	4.6	0.5
10	1	2019	17.6	5.4	4.1	0.0
11	1	2019	18.4	2.6	4.5	10.5
12	1	2019	15.8	3.6	3.8	0.0
13	1	2019	15.8	5.8	3.8	1.3
14	1	2019	18.4	6.8	4.1	0.0
15	1	2019	15.6	6.0	3.6	0.0
16	1	2019	15.8	2.6	3.8	3.1
17	1	2019	15.6	5.8	3.5	0.0
18	1	2019	16.0	6.4	3.6	0.0
19	1	2019	18.2	4.0	4.4	1.9
20	1	2019	16.8	4.0	4.0	0.0
21	1	2019	19.6	5.2	4.5	0.0
22	1	2019	13.6	4.8	3.1	4.0
23	1	2019	19.4	4.4	3.1	4.0
24	1	2019	16.4	4.8	3.7	1.4
25	1	2019	16.8	2.2	4.2	0.0
26	1	2019	17.2	6.8	4.0	0.0
27	1	2019	18.8	5.4	4.4	0.7
28	1	2019	18.0	7.4	4.0	7.9
29	1	2019	16.4	5.6	3.7	2.5
30	1	2019	14.4	7.0	3.1	3.6
31	1	2019	15.8	6.4	3.4	19.4



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (26)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	2	2019	15.4	4.9	3.5	4.1
2	2	2019	14.4	4.8	3.3	0.6
3	2	2019	13.0	7.0	3.3	1.7
4	2	2019	17.4	6.8	3.8	0.0
5	2	2019	17.0	7.2	3.7	0.0
6	2	2019	18.2	6.4	4.0	0.7
7	2	2019	16.2	5.2	3.6	0.0
8	2	2019	15.4	7.4	3.6	7.9
9	2	2019	17.8	6.2	3.8	7.6
10	2	2019	15.8	5.5	3.5	1.8
11	2	2019	14.8	6.2	3.2	3.9
12	2	2019	13.6	4.8	3.0	4.1
13	2	2019	13.8	6.6	2.9	0.1
14	2	2019	17.0	6.2	3.6	0.2
15	2	2019	17.6	6.0	3.9	7.0
16	2	2019	13.8	7.2	2.7	3.7
17	2	2019	16.4	6.8	3.5	0.3
18	2	2019	19.0	6.2	4.0	0.0
19	2	2019	18.8	4.0	4.1	0.0
20	2	2019	15.8	6.6	3.4	0.0
21	2	2019	17.8	4.1	4.0	0.0
22	2	2019	18.8	6.2	4.0	0.0
23	2	2019	18.0	4.6	4.1	0.0
24	2	2019	18.4	4.8	4.1	0.4
25	2	2019	17.8	4.1	4.0	1.3
26	2	2019	18.4	4.2	4.1	5.2
27	2	2019	17.9	3.2	4.0	10.3
28	2	2019	15.4	4.8	3.4	10.4



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (27)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	3	2019	19.0	2.4	4.2	3.2
2	3	2019	18.6	6.8	3.9	0.3
3	3	2019	18.8	5.2	4.0	0.0
4	3	2019	17.8	4.2	3.9	0.5
5	3	2019	18.4	4.2	4.0	0.0
6	3	2019	16.8	4.8	3.6	2.4
7	3	2019	19.8	2.4	4.3	0.0
8	3	2019	19.4	4.0	4.2	0.0
9	3	2019	16.2	2.4	3.6	0.5
10	3	2019	17.8	5.4	3.8	1.0
11	3	2019	18.2	5.6	3.8	6.9
12	3	2019	18.8	4.8	3.8	32.1
13	3	2019	17.6	4.8	3.7	2.4
14	3	2019	17.2	5.2	3.6	20.0
15	3	2019	16.8	6.0	3.5	0.0
16	3	2019	18.0	5.0	3.8	6.7
17	3	2019	14.2	7.0	3.0	0.5
18	3	2019	15.4	5.2	3.1	4.9
19	3	2019	15.6	6.8	3.1	0.8
20	3	2019	15.2	6.2	3.0	3.7
21	3	2019	16.2	6.4	3.2	14.8
22	3	2019	17.0	2.2	3.6	0.0
23	3	2019	18.4	2.4	3.9	0.1
24	3	2019	17.8	6.0	3.5	0.8
25	3	2019	17.6	4.2	3.5	8.0
26	3	2019	18.0	7.0	3.5	0.2
27	3	2019	17.4	6.2	3.4	1.7
28	3	2019	16.4	6.0	3.2	0.2
29	3	2019	16.2	4.8	3.3	0.0
30	3	2019	16.8	5.8	3.3	0.0
31	3	2019	18.8	4.4	3.7	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (28)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	4	2019	15.4	6.4	2.8	9.8
2	4	2019	15.6	6.2	3.0	12.4
3	4	2019	15.2	5.2	2.8	7.9
4	4	2019	16.4	6.4	3.2	0.0
5	4	2019	15.6	1.2	3.4	0.0
6	4	2019	17.0	3.0	3.4	0.0
7	4	2019	16.6	0.2	3.5	0.0
8	4	2019	16.4	2.0	3.4	0.0
9	4	2019	18.0	1.2	3.7	0.0
10	4	2019	19.4	1.6	3.9	0.0
11	4	2019	18.8	5.4	3.7	0.0
12	4	2019	18.2	2.4	3.6	0.0
13	4	2019	18.2	5.2	3.6	0.0
14	4	2019	18.8	2.8	3.6	2.9
15	4	2019	19.4	4.0	3.6	5.0
16	4	2019	15.4	5.4	2.9	0.2
17	4	2019	15.6	7.0	2.8	0.0
18	4	2019	18.0	5.4	3.3	1.4
19	4	2019	17.6	4.8	3.1	4.3
20	4	2019	18.0	4.8	3.2	6.1
21	4	2019	18.0	3.4	3.3	2.6
22	4	2019	18.2	2.6	3.4	0.0
23	4	2019	15.2	4.2	2.8	0.0
24	4	2019	17.0	6.0	3.3	0.2
25	4	2019	18.8	3.7	3.4	0.0
26	4	2019	18.0	5.9	3.0	4.1
27	4	2019	17.0	3.8	3.1	0.0
28	4	2019	15.4	3.8	2.8	0.9
29	4	2019	17.0	2.0	3.1	0.0
30	4	2019	15.4	6.4	2.7	3.9



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (29)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	5	2019	17.2	2.0	3.1	0.0
2	5	2019	19.0	3.6	3.4	0.0
3	5	2019	19.2	-1.0	3.7	0.0
4	5	2019	18.2	0.9	3.3	9.2
5	5	2019	14.0	4.2	2.6	0.0
6	5	2019	17.2	2.8	3.0	2.9
7	5	2019	18.0	5.2	3.1	0.0
8	5	2019	16.4	6.6	2.7	0.3
9	5	2019	15.8	5.6	2.7	0.0
10	5	2019	19.2	0.8	3.3	0.0
11	5	2019	18.0	0.0	3.3	0.0
12	5	2019	17.6	2.8	3.0	5.0
13	5	2019	12.8	5.2	2.2	2.4
14	5	2019	16.0	3.8	2.6	0.0
15	5	2019	15.8	1.6	2.9	0.0
16	5	2019	14.8	-2.2	2.8	0.0
17	5	2019	17.0	-2.2	3.1	0.0
18	5	2019	17.4	-2.8	3.2	0.0
19	5	2019	17.8	-1.4	3.3	0.0
20	5	2019	16.4	-1.6	3.0	0.0
21	5	2019	17.2	-2.0	3.1	0.0
22	5	2019	16.8	-1.4	3.0	0.0
23	5	2019	17.0	2.4	3.1	0.0
24	5	2019	17.0	-2.0	3.2	0.0
25	5	2019	17.2	-2.0	3.1	0.0
26	5	2019	17.0	-1.8	3.1	0.0
27	5	2019	17.8	-2.0	3.1	0.0
28	5	2019	17.8	-2.0	3.2	0.0
29	5	2019	18.6	-1.2	3.2	0.0
30	5	2019	18.0	-2.4	3.2	0.0
31	5	2019	19.0	-2.6	3.3	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (30)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	6	2019	18.0	-3.0	3.6	0.0
2	6	2019	17.2	-2.4	3.0	0.0
3	6	2019	17.0	-4.4	3.1	0.0
4	6	2019	15.8	-2.0	2.8	0.0
5	6	2019	15.8	-4.0	2.8	0.0
6	6	2019	15.6	-4.4	2.9	0.0
7	6	2019	17.0	-6.4	3.1	0.0
8	6	2019	17.4	-6.9	3.2	0.0
9	6	2019	17.6	-5.5	3.2	0.0
10	6	2019	18.0	-3.8	3.2	0.0
11	6	2019	18.2	-1.8	3.1	0.0
12	6	2019	18.2	-1.2	3.1	0.0
13	6	2019	19.2	-0.2	3.2	0.0
14	6	2019	18.2	-0.4	3.0	0.0
15	6	2019	15.6	0.8	2.6	0.0
16	6	2019	12.4	1.4	2.2	0.0
17	6	2019	16.8	0.8	2.7	0.0
18	6	2019	17.8	-2.4	3.1	0.0
19	6	2019	18.4	-1.2	3.1	0.0
20	6	2019	17.6	-2.8	3.0	0.0
21	6	2019	16.2	-4.4	2.9	0.0
22	6	2019	16.2	-5.6	3.0	0.0
23	6	2019	15.8	-6.0	2.9	0.0
24	6	2019	16.4	-6.0	2.9	0.0
25	6	2019	17.0	-7.8	3.2	0.0
26	6	2019	16.2	-6.8	3.1	0.0
27	6	2019	17.0	-4.2	3.1	0.0
28	6	2019	17.8	-2.8	3.2	0.0
29	6	2019	17.8	0.2	2.9	0.0
30	6	2019	18.8	-1.4	3.1	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (31)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	7	2019	18.4	-3.6	3.1	0.0
2	7	2019	20.6	-3.4	3.5	0.0
3	7	2019	19.6	-4.6	3.4	0.0
4	7	2019	19.8	-4.8	3.5	0.0
5	7	2019	17.6	-7.2	3.3	0.0
6	7	2019	18.0	-3.4	3.2	0.0
7	7	2019	17.0	-2.2	3.1	0.0
8	7	2019	16.8	-3.4	3.1	0.0
9	7	2019	16.8	-5.2	3.2	0.0
10	7	2019	17.0	-6.8	3.2	0.0
11	7	2019	17.2	-6.4	3.2	0.0
12	7	2019	17.2	-5.4	3.3	0.0
13	7	2019	17.8	-4.8	3.3	0.0
14	7	2019	16.8	-4.6	3.2	0.0
15	7	2019	17.0	-4.6	3.2	0.0
16	7	2019	17.6	-4.0	3.2	0.0
17	7	2019	15.0	3.2	2.6	0.0
18	7	2019	14.0	3.8	2.4	0.0
19	7	2019	15.4	-2.8	2.9	0.3
20	7	2019	16.4	-2.4	3.0	0.0
21	7	2019	16.8	-2.4	3.1	0.0
22	7	2019	17.6	-3.6	3.3	0.0
23	7	2019	14.0	-3.0	2.8	0.0
24	7	2019	15.4	-1.8	3.0	0.0
25	7	2019	15.2	-5.2	3.0	0.0
26	7	2019	15.8	-9.8	3.3	0.0
27	7	2019	17.4	-8.2	3.5	0.0
28	7	2019	16.2	-4.0	3.3	0.0
29	7	2019	17.4	-0.6	3.4	0.0
30	7	2019	18.8	-3.8	3.6	0.0
31	7	2019	17.0	-4.4	3.4	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (32)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	8	2019	17.6	-5.0	3.4	0.0
2	8	2019	18.8	-3.4	3.6	0.0
3	8	2019	16.0	-4.2	3.2	0.0
4	8	2019	18.2	-7.2	3.7	0.0
5	8	2019	17.8	-7.2	3.6	0.0
6	8	2019	18.2	-7.4	3.8	0.0
7	8	2019	18.6	-6.4	3.8	0.0
8	8	2019	18.8	-5.4	3.9	0.0
9	8	2019	17.2	-4.2	3.5	0.0
10	8	2019	19.0	-3.2	3.9	0.0
11	8	2019	19.4	-4.2	4.0	0.0
12	8	2019	19.8	-2.8	3.9	0.0
13	8	2019	19.4	-4.0	3.9	0.0
14	8	2019	18.6	-2.2	3.7	0.0
15	8	2019	18.2	-3.2	3.7	0.0
16	8	2019	18.6	-3.2	3.8	0.0
17	8	2019	19.5	-3.4	4.0	0.0
18	8	2019	18.8	-3.8	4.0	0.0
19	8	2019	19.0	-2.4	3.9	0.0
20	8	2019	18.6	-1.0	3.7	0.0
21	8	2019	17.8	-2.4	3.7	0.0
22	8	2019	17.8	-1.8	3.7	0.0
23	8	2019	17.2	-3.2	3.7	0.0
24	8	2019	17.2	-0.4	3.6	0.0
25	8	2019	15.4	1.8	3.2	0.0
26	8	2019	16.0	-6.4	3.8	0.0
27	8	2019	16.4	-3.4	3.7	0.0
28	8	2019	17.2	-3.0	3.8	0.0
29	8	2019	17.6	-4.0	3.9	0.0
30	8	2019	18.6	-4.0	4.0	0.0
31	8	2019	18.8	-2.0	4.0	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (33)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	9	2019	18.6	-1.2	4.0	0.0
2	9	2019	19.4	-0.4	4.1	0.0
3	9	2019	17.8	0.2	3.9	1.1
4	9	2019	16.6	2.6	3.6	0.0
5	9	2019	15.2	4.0	3.2	0.0
6	9	2019	18.2	1.8	3.9	0.1
7	9	2019	15.2	-1.0	3.4	0.1
8	9	2019	17.6	-2.0	4.0	0.0
9	9	2019	19.2	-2.8	4.3	0.0
10	9	2019	19.4	-0.8	4.2	0.0
11	9	2019	16.4	3.0	3.6	0.0
12	9	2019	18.0	5.8	3.7	0.0
13	9	2019	17.6	2.6	3.7	1.3
14	9	2019	19.2	2.8	4.0	0.2
15	9	2019	20.4	2.0	4.2	0.0
16	9	2019	20.0	0.2	4.3	0.0
17	9	2019	20.6	-2.2	4.7	0.0
18	9	2019	20.6	0.8	4.5	0.0
19	9	2019	21.0	1.0	4.6	0.0
20	9	2019	20.4	1.8	4.4	0.0
21	9	2019	18.0	4.8	3.9	0.0
22	9	2019	19.0	7.2	3.8	0.3
23	9	2019	19.8	-1.8	4.5	0.0
24	9	2019	20.2	0.0	4.5	0.2
25	9	2019	21.0	0.0	4.8	0.0
26	9	2019	19.0	2.9	4.3	0.0
27	9	2019	18.2	1.0	4.3	0.0
28	9	2019	21.4	-0.2	5.0	0.0
29	9	2019	22.0	-4.2	5.2	0.0
30	9	2019	20.0	0.6	4.6	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017

- 2020– Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (34)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo (mm/día)	PP (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	10	2019	16.4	5.2	3.6	3.7
2	10	2019	15.6	3.6	3.4	3.4
3	10	2019	17.8	3.2	3.9	18.0
4	10	2019	14.0	3.0	3.2	0.0
5	10	2019	18.2	0.1	4.3	0.0
6	10	2019	17.6	3.2	4.1	0.0
7	10	2019	17.4	2.8	4.2	0.0
8	10	2019	17.2	-4.0	4.5	0.0
9	10	2019	17.6	-1.2	4.4	0.0
10	10	2019	18.9	-3.4	4.9	0.0
11	10	2019	19.0	-2.0	4.8	0.0
12	10	2019	20.2	0.2	4.8	0.0
13	10	2019	20.8	2.4	4.7	6.0
14	10	2019	19.0	3.2	4.3	0.2
15	10	2019	18.0	5.4	4.0	10.4
16	10	2019	19.2	4.8	4.2	7.2
17	10	2019	17.6	5.4	3.9	3.9
18	10	2019	17.6	6.0	3.8	0.4
19	10	2019	18.2	4.8	4.0	11.7
20	10	2019	16.2	2.0	3.8	0.0
21	10	2019	19.0	1.2	4.5	0.0
22	10	2019	18.6	2.8	4.4	0.0
23	10	2019	19.2	1.0	4.7	0.0
24	10	2019	19.2	0.8	4.6	0.0
25	10	2019	19.6	2.8	4.6	0.0
26	10	2019	19.8	3.0	4.7	0.0
27	10	2019	19.2	4.4	4.4	0.0
28	10	2019	21.0	1.0	5.0	0.0
29	10	2019	21.0	1.2	5.0	0.1
30	10	2019	21.2	-1.0	5.2	0.0
31	10	2019	18.0	0.7	4.5	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017

- 2020- Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (35)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	11	2019	18.0	5.2	4.3	0.0
2	11	2019	20.0	0.8	4.9	0.0
3	11	2019	21.0	2.6	4.9	17.5
4	11	2019	18.0	4.2	4.2	5.2
5	11	2019	17.8	4.2	4.0	2.4
6	11	2019	16.2	4.2	3.6	5.9
7	11	2019	18.2	5.0	4.1	2.8
8	11	2019	18.6	5.2	4.2	0.1
9	11	2019	18.8	4.0	4.4	0.0
10	11	2019	19.4	5.2	4.3	26.7
11	11	2019	11.8	0.6	3.0	10.1
12	11	2019	17.2	4.8	3.9	1.1
13	11	2019	17.6	5.2	4.0	0.0
14	11	2019	19.8	5.6	4.4	1.9
15	11	2019	15.0	6.6	3.2	2.3
16	11	2019	16.8	3.2	4.0	0.0
17	11	2019	17.2	3.4	4.2	0.0
18	11	2019	17.8	5.6	4.2	0.0
19	11	2019	16.6	4.3	4.2	0.0
20	11	2019	17.0	1.4	4.4	0.4
21	11	2019	18.8	2.8	4.5	4.2
22	11	2019	17.8	4.8	4.1	0.0
23	11	2019	15.8	6.0	3.6	0.0
24	11	2019	17.6	7.0	3.6	0.0
25	11	2019	19.2	3.4	4.5	13.5
26	11	2019	19.0	4.4	4.4	0.0
27	11	2019	20.2	5.8	4.7	0.0
28	11	2019	15.2	7.2	4.5	0.0
29	11	2019	20.4	3.6	4.9	0.0
30	11	2019	21.2	3.8	5.1	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (36)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	12	2019	20.4	4.2	4.8	21.5
2	12	2019	15.9	7.4	3.3	3.9
3	12	2019	18.6	5.2	4.3	0.3
4	12	2019	19.2	3.8	4.4	15.0
5	12	2019	15.2	7.2	3.3	0.0
6	12	2019	17.4	7.6	3.7	8.6
7	12	2019	17.9	6.2	3.6	0.4
8	12	2019	17.4	6.0	3.9	0.0
9	12	2019	18.6	4.4	4.4	0.0
10	12	2019	18.8	6.6	4.3	1.9
11	12	2019	17.6	5.8	4.0	0.6
12	12	2019	18.4	6.7	4.1	0.5
13	12	2019	15.6	2.6	3.9	0.0
14	12	2019	18.0	5.8	4.2	0.9
15	12	2019	18.0	6.8	3.9	10.4
16	12	2019	18.4	4.2	4.3	15.4
17	12	2019	19.2	3.8	4.5	0.0
18	12	2019	18.0	6.8	3.9	0.4
19	12	2019	16.6	4.2	3.9	4.2
20	12	2019	15.1	6.8	3.9	0.0
21	12	2019	17.8	5.0	4.1	0.0
22	12	2019	16.2	5.6	3.6	0.0
23	12	2019	18.2	4.2	4.1	1.9
24	12	2019	19.0	4.8	4.4	0.0
25	12	2019	18.4	6.2	4.1	0.0
26	12	2019	18.4	5.8	4.1	2.7
27	12	2019	18.2	6.1	4.1	0.0
28	12	2019	18.2	6.8	4.1	0.0
29	12	2019	18.0	5.4	4.1	0.0
30	12	2019	18.0	4.2	4.3	0.0
31	12	2019	16.4	5.8	3.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (37).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	1	2020	16.0	5.8	3.5	10.1
2	1	2020	14.2	6.8	3.0	2.7
3	1	2020	15.4	6.8	4.5	0.9
4	1	2020	18.0	7.0	3.9	17.5
5	1	2020	18.8	5.2	4.2	32.9
6	1	2020	18.4	3.8	4.4	0.4
7	1	2020	14.4	4.8	3.5	0.0
8	1	2020	18.4	4.2	4.5	0.0
9	1	2020	19.0	3.8	4.5	0.0
10	1	2020	17.8	3.4	4.2	12.3
11	1	2020	16.2	1.6	3.9	5.1
12	1	2020	17.8	6.8	3.9	0.3
13	1	2020	14.8	5.4	3.3	1.3
14	1	2020	16.2	7.4	3.4	0.6
15	1	2020	15.0	7.0	3.1	9.7
16	1	2020	15.8	5.8	3.6	1.7
17	1	2020	16.2	3.8	3.8	1.0
18	1	2020	18.2	5.9	4.1	0.0
19	1	2020	19.0	6.8	4.3	0.0
20	1	2020	18.0	6.0	4.0	23.7
21	1	2020	17.0	7.8	3.4	5.1
22	1	2020	17.2	5.0	3.8	6.8
23	1	2020	17.0	6.8	3.7	0.0
24	1	2020	19.0	5.2	4.4	0.0
25	1	2020	18.2	5.0	4.1	2.4
26	1	2020	19.6	4.4	4.5	0.0
27	1	2020	21.4	4.4	4.8	0.0
28	1	2020	18.0	4.8	4.1	0.0
29	1	2020	18.8	7.0	4.2	0.0
30	1	2020	19.0	5.6	4.2	1.8
31	1	2020	17.2	6.8	3.7	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (38).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	2	2020	13.4	5.0	3.0	0.0
2	2	2020	19.0	6.0	4.1	9.7
3	2	2020	16.6	7.2	3.6	1.6
4	2	2020	17.2	7.4	3.5	9.8
5	2	2020	14.2	6.4	2.9	3.2
6	2	2020	16.8	7.2	3.4	23.4
7	2	2020	15.8	6.2	3.4	2.2
8	2	2020	12.4	7.0	2.4	5.3
9	2	2020	16.0	6.8	3.3	3.8
10	2	2020	14.4	6.0	3.4	11.1
11	2	2020	15.8	7.2	3.5	3.2
12	2	2020	16.0	6.7	3.3	4.2
13	2	2020	15.2	7.2	3.1	7.7
14	2	2020	14.6	6.2	3.0	0.5
15	2	2020	15.5	5.8	3.3	3.1
16	2	2020	18.8	5.4	4.1	0.0
17	2	2020	20.2	5.8	4.4	3.3
18	2	2020	17.0	7.2	3.5	0.0
19	2	2020	16.0	7.0	3.3	0.0
20	2	2020	16.6	6.8	3.4	3.7
21	2	2020	8.2	7.0	1.4	18.5
22	2	2020	15.4	5.6	3.2	2.7
23	2	2020	19.2	7.8	3.9	0.3
24	2	2020	19.2	7.6	3.9	0.0
25	2	2020	19.2	6.4	4.0	3.9
26	2	2020	17.0	7.0	3.5	3.3
27	2	2020	16.8	7.2	3.4	4.7
28	2	2020	17.4	7.2	3.5	0.0
29	2	2020	18.0	8.2	3.5	0.2



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020-

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (39).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	3	2020	19.0	7.2	4.0	0.0
2	3	2020	18.2	7.0	3.9	5.7
3	3	2020	18.0	6.6	3.9	0.0
4	3	2020	15.8	6.8	3.5	1.7
5	3	2020	17.4	6.4	3.6	0.0
6	3	2020	16.4	6.2	3.3	0.0
7	3	2020	17.6	5.8	3.6	0.8
8	3	2020	19.0	5.0	4.1	0.0
9	3	2020	16.6	5.9	3.5	2.3
10	3	2020	16.8	5.0	3.8	5.8
11	3	2020	16.0	4.6	3.4	0.0
12	3	2020	16.2	6.2	3.3	4.5
13	3	2020	14.4	6.0	2.9	1.5
14	3	2020	16.8	4.6	3.4	1.1
15	3	2020	17.2	7.8	3.4	0.0
16	3	2020	17.4	6.0	3.6	2.6
17	3	2020	15.4	7.0	3.0	0.0
18	3	2020	15.4	5.2	3.1	4.9
19	3	2020	15.6	6.8	3.1	0.8
20	3	2020	15.2	6.2	3.0	3.7
21	3	2020	16.2	6.4	3.2	14.8
22	3	2020	17.0	2.2	3.6	0.0
23	3	2020	18.4	2.4	3.9	0.1
24	3	2020	17.8	6.0	3.5	0.8
25	3	2020	17.6	4.2	3.5	8.0
26	3	2020	18.0	7.0	3.5	0.2
27	3	2020	17.4	6.2	3.4	1.7
28	3	2020	16.4	6.0	3.2	0.2
29	3	2020	16.2	4.8	3.3	0.0
30	3	2020	16.8	5.8	3.3	0.0
31	3	2020	18.8	4.4	3.7	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (40).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)			ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA			
1	4	2020	15.4	6.4	2.8	9.8	
2	4	2020	15.6	6.2	3.0	12.4	
3	4	2020	15.2	5.2	2.8	7.9	
4	4	2020	16.4	6.4	3.2	0.0	
5	4	2020	15.6	1.2	3.4	0.0	
6	4	2020	17.0	3.0	3.4	0.0	
7	4	2020	16.6	0.2	3.5	0.0	
8	4	2020	16.4	2.0	3.4	0.0	
9	4	2020	18.0	1.2	3.7	0.0	
10	4	2020	19.4	1.6	3.9	0.0	
11	4	2020	18.8	5.4	3.7	0.0	
12	4	2020	18.2	2.4	3.6	0.0	
13	4	2020	18.2	5.2	3.6	0.0	
14	4	2020	18.8	2.8	3.6	2.9	
15	4	2020	19.4	4.0	3.6	5.0	
16	4	2020	15.4	5.4	2.9	0.2	
17	4	2020	15.6	7.0	2.8	0.0	
18	4	2020	18.0	5.4	3.3	1.4	
19	4	2020	17.6	4.8	3.1	4.3	
20	4	2020	18.0	4.8	3.2	6.1	
21	4	2020	18.0	3.4	3.3	2.6	
22	4	2020	18.2	2.6	3.4	0.0	
23	4	2020	15.2	4.2	2.8	0.0	
24	4	2020	17.0	6.0	3.3	0.2	
25	4	2020	18.8	3.7	3.4	0.0	
26	4	2020	18.0	5.9	3.0	4.1	
27	4	2020	17.0	3.8	3.1	0.0	
28	4	2020	15.4	3.8	2.8	0.9	
29	4	2020	17.0	2.0	3.1	0.0	
30	4	2020	15.4	6.4	2.7	3.9	



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (41).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	5	2020	16.8	-2.0	3.6	0.0
2	5	2020	17.4	-2.8	3.4	0.0
3	5	2020	18.0	-1.0	3.4	0.0
4	5	2020	18.4	-0.6	3.4	0.0
5	5	2020	16.2	-0.2	3.1	0.0
6	5	2020	17.2	0.2	3.3	0.0
7	5	2020	17.2	0.8	3.1	0.0
8	5	2020	17.6	1.8	3.1	0.0
9	5	2020	18.4	-1.6	3.7	0.0
10	5	2020	17.2	-0.2	3.2	0.0
11	5	2020	18.4	-1.2	3.3	0.0
12	5	2020	18.2	-0.8	3.3	0.0
13	5	2020	17.8	0.8	3.2	0.0
14	5	2020	18.0	-0.3	3.1	0.2
15	5	2020	16.4	0.6	2.8	0.4
16	5	2020	15.8	4.8	2.7	0.3
17	5	2020	16.8	2.8	3.0	0.0
18	5	2020	17.2	0.2	3.1	0.0
19	5	2020	17.6	-2.2	3.4	0.0
20	5	2020	17.6	-1.2	3.3	0.0
21	5	2020	17.2	1.8	3.1	6.8
22	5	2020	14.8	4.0	2.4	7.3
23	5	2020	14.8	4.6	2.4	3.3
24	5	2020	13.0	3.6	2.1	1.0
25	5	2020	15.0	2.8	2.4	0.0
26	5	2020	15.2	1.0	2.6	0.0
27	5	2020	16.8	0.8	2.7	1.9
28	5	2020	15.8	4.9	2.5	0.0
29	5	2020	15.4	5.2	2.3	5.8
30	5	2020	10.2	4.6	1.6	5.6
31	5	2020	16.2	-0.6	2.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (42).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	6	2020	15.4	-1.2	2.8	0.0
2	6	2020	16.6	-1.0	2.9	0.0
3	6	2020	16.4	0.6	2.8	0.4
4	6	2020	16.8	-0.4	2.9	0.0
5	6	2020	16.2	-0.4	2.9	0.0
6	6	2020	15.8	-1.2	2.8	0.0
7	6	2020	17.0	5.0	2.8	0.0
8	6	2020	15.4	-2.6	2.9	0.0
9	6	2020	13.2	-3.0	2.4	1.7
10	6	2020	11.6	1.4	2.0	3.8
11	6	2020	11.8	2.2	2.1	0.2
12	6	2020	15.2	-1.2	2.6	0.0
13	6	2020	14.8	-1.4	2.6	0.0
14	6	2020	15.4	-1.8	2.7	0.0
15	6	2020	15.6	-2.0	2.8	0.0
16	6	2020	16.0	-1.8	2.9	0.0
17	6	2020	16.8	-2.0	2.9	0.0
18	6	2020	15.8	-2.2	2.8	0.0
19	6	2020	14.8	-3.0	2.7	0.0
20	6	2020	15.8	-2.4	2.8	0.0
21	6	2020	16.8	-3.0	2.8	0.0
22	6	2020	13.6	-3.2	2.6	0.0
23	6	2020	16.4	-5.8	3.0	0.0
24	6	2020	17.0	-4.4	3.1	0.0
25	6	2020	16.6	-3.0	2.9	0.0
26	6	2020	17.4	-2.8	3.0	0.0
27	6	2020	17.8	-2.8	3.1	0.0
28	6	2020	18.0	-1.4	3.1	0.0
29	6	2020	16.8	-3.6	3.0	0.0
30	6	2020	17.6	-2.0	3.0	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (43).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	7	2020	16.8	0.0	2.9	7.0
2	7	2020	14.8	1.6	2.4	0.3
3	7	2020	15.0	-1.1	2.8	0.0
4	7	2020	15.8	-2.2	2.9	0.0
5	7	2020	16.0	-4.2	3.0	0.0
6	7	2020	16.6	-3.6	3.0	0.0
7	7	2020	16.6	-2.6	3.0	0.0
8	7	2020	15.8	-4.0	2.9	0.0
9	7	2020	15.8	-4.6	2.9	0.0
10	7	2020	15.8	-6.4	3.1	0.0
11	7	2020	16.2	-6.2	3.1	0.0
12	7	2020	17.2	-5.8	3.3	0.0
13	7	2020	18.0	-5.6	3.6	0.0
14	7	2020	17.8	-4.8	3.5	0.0
15	7	2020	17.8	-4.2	3.4	0.0
16	7	2020	19.2	-4.0	3.5	0.0
17	7	2020	18.0	-1.8	3.3	0.0
18	7	2020	18.4	-2.0	3.3	0.0
19	7	2020	18.2	-3.8	3.4	0.0
20	7	2020	19.6	-4.8	3.8	0.0
21	7	2020	19.2	-4.8	3.5	0.0
22	7	2020	19.0	-4.2	3.7	0.0
23	7	2020	18.0	-4.2	3.4	0.0
24	7	2020	18.8	-5.2	3.5	0.0
25	7	2020	17.6	-5.4	3.5	0.0
26	7	2020	16.6	-5.4	3.2	0.0
27	7	2020	16.0	-5.6	3.2	0.0
28	7	2020	16.0	-4.4	3.1	0.0
29	7	2020	17.2	-5.1	3.3	0.0
30	7	2020	17.8	-5.0	3.4	0.0
31	7	2020	18.4	-4.8	3.8	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (44).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		E To	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	8	2020	18.0	-4.2	3.5	0.0
2	8	2020	20.0	-3.0	3.8	0.0
3	8	2020	20.2	-4.8	3.9	0.0
4	8	2020	19.0	-4.2	3.7	0.0
5	8	2020	19.4	-3.2	3.7	0.0
6	8	2020	19.8	-3.6	3.8	0.0
7	8	2020	18.8	-4.0	3.8	0.0
8	8	2020	19.8	-3.6	3.8	0.0
9	8	2020	16.4	0.2	3.2	0.0
10	8	2020	16.2	-1.6	3.3	0.0
11	8	2020	17.0	-2.8	3.5	0.0
12	8	2020	16.6	-6.2	3.6	0.0
13	8	2020	17.4	-7.2	3.7	0.0
14	8	2020	17.8	-4.2	3.6	0.0
15	8	2020	17.2	-1.8	3.4	0.0
16	8	2020	18.4	-3.2	3.7	0.0
17	8	2020	15.4	0.6	3.1	0.0
18	8	2020	16.0	3.4	3.1	0.0
19	8	2020	15.6	-7.2	3.5	0.0
20	8	2020	17.2	-6.8	3.7	0.0
21	8	2020	17.8	-4.0	3.7	0.0
22	8	2020	18.4	-2.8	3.6	0.0
23	8	2020	18.8	-4.8	4.0	0.0
24	8	2020	19.2	-2.4	3.9	0.0
25	8	2020	19.2	-2.2	3.9	0.0
26	8	2020	20.0	1.8	3.9	0.0
27	8	2020	20.0	0.4	4.1	0.0
28	8	2020	19.8	0.2	4.1	0.0
29	8	2020	19.8	-0.4	4.1	0.0
30	8	2020	18.2	-1.4	3.9	0.0
31	8	2020	18.8	-1.4	3.9	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (45).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION
			MÁXIMA	MÍNIMA		(mm/día)
1	9	2020	18.6	-1.2	4.0	0.0
2	9	2020	19.4	-0.4	4.1	0.0
3	9	2020	20.0	1.0	4.3	0.0
4	9	2020	21.0	1.1	4.2	0.0
5	9	2020	21.6	0.0	4.4	0.0
6	9	2020	21.8	1.6	4.7	0.0
7	9	2020	18.4	3.4	3.6	2.8
8	9	2020	16.2	2.0	3.2	2.0
9	9	2020	19.4	1.2	4.1	0.0
10	9	2020	19.2	0.4	4.2	0.0
11	9	2020	20.0	0.4	4.3	0.0
12	9	2020	19.8	2.4	4.2	0.2
13	9	2020	18.2	-1.2	3.9	0.6
14	9	2020	17.8	1.4	3.9	0.0
15	9	2020	16.4	6.1	3.4	0.9
16	9	2020	18.2	5.4	3.7	0.0
17	9	2020	16.8	2.0	3.8	0.0
18	9	2020	16.8	4.2	3.4	5.3
19	9	2020	17.8	3.2	3.8	4.3
20	9	2020	16.8	4.2	3.4	0.9
21	9	2020	20.2	1.2	4.6	0.0
22	9	2020	18.6	-1.6	4.4	0.0
23	9	2020	18.8	-1.2	4.4	0.0
24	9	2020	18.2	-5.4	4.5	0.0
25	9	2020	18.2	-2.2	4.4	0.0
26	9	2020	19.2	-1.2	4.5	0.0
27	9	2020	19.8	-1.0	4.8	0.0
28	9	2020	16.8	5.2	3.7	26.4
29	9	2020	14.2	3.0	3.3	0.0
30	9	2020	17.0	5.8	3.7	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (46).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	10	2020	19.0	4.2	4.1	1.1
2	10	2020	18.0	3.0	4.0	2.1
3	10	2020	17.2	2.4	4.0	0.0
4	10	2020	16.8	3.4	4.0	0.0
5	10	2020	18.4	-0.2	4.3	0.0
6	10	2020	19.6	-0.4	4.6	0.0
7	10	2020	15.4	1.6	3.7	0.0
8	10	2020	17.6	1.8	4.2	0.0
9	10	2020	20.8	0.4	4.9	0.0
10	10	2020	19.8	0.0	4.7	0.0
11	10	2020	18.0	1.4	4.4	2.0
12	10	2020	17.0	1.2	4.0	3.6
13	10	2020	16.8	2.0	4.2	21.5
14	10	2020	15.2	3.0	3.3	2.5
15	10	2020	14.0	4.0	3.3	0.0
16	10	2020	17.0	4.8	3.7	16.2
17	10	2020	16.8	2.0	3.9	7.3
18	10	2020	17.6	6.0	3.8	0.4
19	10	2020	15.8	3.8	3.6	1.2
20	10	2020	16.4	3.8	3.8	0.0
21	10	2020	16.8	5.0	3.8	1.2
22	10	2020	15.0	5.2	3.5	7.6
23	10	2020	17.8	5.6	3.9	0.2
24	10	2020	18.8	3.4	4.4	0.0
25	10	2020	18.0	1.8	5.2	0.0
26	10	2020	17.6	6.0	3.8	0.4
27	10	2020	20.6	3.0	4.0	2.1
28	10	2020	20.0	-3.4	5.3	0.0
29	10	2020	19.8	-1.4	5.0	0.0
30	10	2020	17.8	2.0	4.4	0.0
31	10	2020	21.0	7.6	4.6	0.5



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (47).

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	11	2020	20.0	4.0	4.6	0.0
2	11	2020	19.8	6.2	4.5	0.0
3	11	2020	20.4	3.1	4.8	0.0
4	11	2020	19.8	1.8	4.8	0.0
5	11	2020	20.0	-0.4	4.9	0.0
6	11	2020	20.6	1.2	5.1	0.0
7	11	2020	19.8	-0.2	5.0	0.0
8	11	2020	19.8	0.4	5.0	0.0
9	11	2020	19.8	2.2	4.9	0.8
10	11	2020	19.0	-0.4	4.8	0.0
11	11	2020	20.4	4.2	4.8	0.4
12	11	2020	21.2	2.8	5.1	0.0
13	11	2020	21.0	-0.2	5.3	0.0
14	11	2020	20.4	1.8	5.1	0.0
15	11	2020	23.0	0.0	5.6	0.0
16	11	2020	21.4	6.4	5.1	0.0
17	11	2020	22.4	3.2	5.4	0.0
18	11	2020	21.8	-1.8	5.7	0.0
19	11	2020	20.8	2.4	5.2	0.0
20	11	2020	20.8	1.2	5.2	0.0
21	11	2020	22.4	1.2	5.5	0.0
22	11	2020	21.8	0.8	5.5	0.0
23	11	2020	21.4	0.6	5.3	0.0
24	11	2020	23.2	-0.8	5.8	0.0
25	11	2020	22.4	1.6	5.6	0.0
26	11	2020	20.8	2.5	5.0	2.4
27	11	2020	20.2	5.8	4.7	0.0
28	11	2020	18.6	4.8	4.4	0.0
29	11	2020	20.4	6.4	4.7	0.0
30	11	2020	21.4	3.2	5.1	0.0



Temperatura máxima, mínima, y Precipitación diaria años 2017 - 2020–

Estación meteorológica Azángaro y cálculo de ETo (48)

DIA	MES	AÑO	TEMPERATURA (°c)		ETo	PRECIPITACION (mm/día)
			MÁXIMA	MÍNIMA		
1	12	2020	18.5	4.0	4.2	4.9
2	12	2020	19.8	5.6	4.5	2.2
3	12	2020	21.0	5.2	4.8	1.7
4	12	2020	17.2	6.4	3.8	0.3
5	12	2020	19.2	7.4	4.3	1.1
6	12	2020	16.4	7.2	3.4	2.9
7	12	2020	19.8	4.8	4.6	0.0
8	12	2020	20.6	4.0	4.9	0.0
9	12	2020	22.0	3.2	5.3	0.1
10	12	2020	19.6	5.2	4.8	0.0
11	12	2020	20.8	3.4	5.1	0.0
12	12	2020	21.4	2.2	5.2	0.0
13	12	2020	20.8	3.2	5.0	0.0
14	12	2020	20.8	2.8	5.1	0.0
15	12	2020	20.0	3.8	4.9	0.0
16	12	2020	19.4	2.2	4.8	1.7
17	12	2020	20.4	2.0	4.8	0.0
18	12	2020	20.0	5.6	4.6	0.0
19	12	2020	21.0	2.8	5.1	0.0
20	12	2020	20.0	2.4	4.8	2.1
21	12	2020	19.2	6.8	4.2	1.1
22	12	2020	12.4	6.4	2.7	2.4
23	12	2020	17.6	3.6	4.1	0.1
24	12	2020	17.4	7.8	3.7	2.1
25	12	2020	19.0	7.0	4.1	3.8
26	12	2020	12.0	5.0	2.7	3.4
27	12	2020	13.2	5.2	2.8	7.2
28	12	2020	8.4	6.8	1.6	10.8
29	12	2020	14.0	5.4	3.1	1.1
30	12	2020	17.0	6.8	3.7	12.5
31	12	2020	11.2	5.6	2.5	1.9

Anexo 3: Dosel simulado en periodo vegetativo

Datos de cobertura del dosel durante el periodo vegetativo del cultivo de papa con valores simulados por AquaCrop mediante R Pearson.

(Lámina óptima)

DDS	COBERTURA DOSEL (Lámina óptima)			Promedio Observado	Simulado
	1To				
14	0	0	0	0	0
21	0.1	0.1	0	0.1	0
28	1.3	1	1.1	1.1	1.7
45	13.2	13.1	13.2	13.2	6.4
54	23.2	24.2	25.2	24.2	12.6
65	35.6	39.7	39.5	38.3	30.2
72	35.4	37.4	39.5	37.4	48.6
81	57.1	57.6	58.3	57.7	62.5
95	59.8	61.6	62.4	61.3	71.5
102	65	65.5	66.1	65.5	73.4
109	62.9	64.3	63.7	63.6	74.6
116	57.2	59.3	61.2	59.2	75.2
122	75.2	73.4	76.8	75.1	75.5
134	76.2	75.7	76.8	76.2	75.8
141	68.5	64.6	65.9	66.3	68.5
149	60.7	60.5	60.8	60.7	63.1
155	55.9	52.3	54.1	54.1	57.1
163	46.2	41.5	46.5	44.7	51.2

(Lamina de Lluvia)

DD S	COBERTURA DOSEL (Lámina reducida)						Promedio Observado	Simulado
	1 T1			2 T1				
14	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0
21	0.4	0.2	0	0.1	0.1	0	0.1	0
28	1	0.5	0.5	2.5	2	0.1	1.1	1.1
45	7.2	5.5	4	6.1	7.5	5.7	6	6.2
54	15.9	14.9	13	14.7	16.7	13.5	14.8	12.6
65	39.3	24.1	21.1	31.4	31.4	22.1	28.2	30.2
72	39.1	28.4	24.9	30.4	34.1	25.7	30.4	34.5
81	58.1	59.2	56.7	60	60.9	55.4	58.4	55.1
95	61.8	61	65	67.8	66.4	61	63.8	64.2
102	60.7	59.1	63.5	65.4	64.1	60.7	62.3	65.1
109	61.3	60.9	64.8	67.7	66.4	61.3	63.7	65.1
116	63.9	62.8	65.9	66.8	68.5	63.7	65.3	65.3
122	57.8	59.4	59.1	60.7	57.2	62.5	59.5	60.8
134	57.4	59.2	58.9	59.7	57.2	61.9	59.1	58.7
141	56.4	56.4	56.4	55.3	54.8	57.1	56.1	54.3
149	54.1	55.4	56.4	54.3	53.2	54.7	54.7	53.1
155	46.1	46.2	47.7	49.3	46.9	47.9	47.4	47.3
163	36.1	38.4	35.1	36.6	34.2	32.5	35.5	31.2

Anexo 4: Panel fotográfico

Panel fotográfico del proceso experimental según características de la parcela experimental



Estación meteorológica de Azángaro (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018)



Diagnóstico del área experimental (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2017).



Muestra de estudio M-1 (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Muestra de estudio M-2 (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Muestra de estudio M-3 (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Seguimiento al proceso (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Seguimiento al proceso (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Seguimiento al proceso medición de raíz (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



Parcela experimental (Foto de autoría – Jesús. Puma C - 2018).



A: peso de muestras de biomasa aérea de cultivo de papa y B: Pesado de Biomasa radicular (sin tubérculo) de cultivo de la papa.