

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA



**EFEECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE PAPA, VARIEDAD ÚNICA BAJO
CONDICIONES DE LA MOLINA**

Presentado por:

CÉSAR MATIAS ORDOÑEZ PAZ

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA

Lima - Perú
2016

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi padre, Julio Cesar Ordoñez Mera, por ser un gran hombre al cual quiero y admiro, por brindarme su apoyo incondicional y enseñarme que todo es posible con mucho esfuerzo.

A mi madre, Janeth del Pilar Paz Ambrosio, por dedicarse íntegramente a sus hijos, por su preocupación para que logre culminar mis estudios y por el gran amor que me brinda día a día.

A mi hermano, Julio Ordoñez Paz, por ser un vencedor y soñador, gracias por tus consejos y cariño.

A mis hermanitos, Víctor Ordoñez Paz y Angélica Ordoñez Paz, por brindarme su compañía y apoyo todo el tiempo.

A mi fiel compañera Lilian Pasapera Vargas, por ser incondicional en todo momento y brindarme siempre una palabra de aliento.

En memoria de mi abuelo, Zacarías Ordoñez Rojas, por demostrarme que un hombre puede lograr todos sus objetivos en la vida y por el gran amor que me mostro mientras estuvo a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Doctora Lía Ramos Fernández, patrocinadora del presente trabajo de investigación, por su colaboración en la elaboración y culminación de la Tesis.

Al Centro Internacional de la Papa – Unidad de Mejoramiento Genético, por su colaboración en la obtención de datos importantes para la ejecución de la Tesis.

Al Departamento de Fitotecnia de la Facultad de Agronomía.

RESUMEN

La presente tesis tiene por objetivo general determinar el efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa variedad “Única” ante seis escenarios de cambio climático bajo condiciones de La Molina.

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en tres etapas, la primera etapa consistió en implementar el cultivo de papa variedad Única en la parcela demostrativa y experimental de riegos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, durante todo el ciclo vegetativo se determinaron las características de clima, suelo, riego y cultivo. La segunda etapa consistió en calibrar y validar los parámetros del modelo Agrometeorológico AquaCROP, usando las características obtenidas de los levantamientos en campo a lo largo del periodo vegetativo. La tercera etapa consistió en procesar la información de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para seis escenarios de cambio climático. Con la información obtenida se proyectó la evapotranspiración usando la ecuación de Hargreaves calibrada para condiciones de La Molina y los rendimientos usando el modelo agrometeorológico AquaCROP calibrado, finalmente las proyecciones fueron comparadas con registros históricos.

Con respecto a la evapotranspiración, se determinó que entre los meses de enero a mayo dicha variable sufre ligeras variaciones, por otro lado entre los meses de mayo a diciembre se encuentran incrementos de hasta 50.74%, dichos incrementos llevaron a obtener valores promedio anual que varían en un rango de 1276.2 a 1394.7 mm. Con respecto a los rendimientos, se encontraron años en los cuales la precipitación estaría regulando el déficit hídrico producido por el incremento de la evapotranspiración, también se encontraron años en los que el cultivo sufre estrés hídrico, lo cual se traduce en un menor rendimiento. Debido a esto se optó por aumentar la lámina de riego actual en $500\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, con este incremento se logra reducir el estrés hídrico y a aumentar los rendimientos más bajos. De lo mencionado se concluye que las condiciones de La Molina para la producción del cultivo de papa Variedad Única ante los seis escenarios de cambio climático no serán muy adversas, no obstante será necesario modificar la lámina de riego en los años más extremos.

SUMMARY

This thesis has the general objective determine the effect of climate change in the evapotranspiration, and potato yield crop, variety "Única", under six scenarios of climate change under conditions of La Molina.

The development of the research was carried out in three stages, the first stage was to implement the potato crop, variety "Única", in the demonstrative plot and experimental of irrigation, of the Faculty of Agricultural Engineering, throughout the growing cycle it was determined the characteristics of climate, soil, irrigation and cultivation. The second stage consisted, in calibrate and validate the model parameters Agrometeorological AquaCrop, using the characteristics obtained from field throughout the growing season. The third stage consisted to process information of precipitation, maximum temperature and minimum temperature for six climate scenarios change, with the information obtained, was screened evapotranspiration using the calibrated Hargreaves equation for conditions of La Molina and the yields using agrometeorological model AquaCrop calibrated, finally the projections were compared with historical records.

With regard to evapotranspiration, it was determined that between the months of January to May the Variable suffers slight variations, on the other hand between the months of May to December are increments found up 50.74 %, these increases led to obtain average annual values range in range of 1276.2 to 1394.7 mm. With regard to crop yield, years were found in which the precipitation would regulate the water deficit caused by increased evapotranspiration, also they were found years in which crop is under water stress, which results in a lower yield. Because of this it was decided to increase the irrigation volume in $500\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$, with this increase is achieved by reducing water stress and lower yields increase. From the above it is concluded that the conditions of La Molina for the production of potato crop, variety "Única", for the six climate scenarios change, will be not very adverse, however will necessary to modify the irrigation depth in the most extreme years.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCION.....	16
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	17
2.1.	Evapotranspiración	17
2.1.1.	Factores que afectan la evapotranspiración	19
2.1.2.	Conceptos de evapotranspiración	21
2.1.3.	Estimación de la evapotranspiración.....	24
2.2.	Modelo Agrometeorológico AquaCROP	27
2.2.1.	Características del modelo	28
2.2.2.	Ventajas del modelo.....	31
2.2.3.	Descripción del Modelo Agrometeorológico AquaCROP.....	33
2.2.4.	Esquema de cálculo de AquaCROP.....	35
2.2.5.	Simulación de los desarrollos agronómicos del cultivo	37
2.3.	Cambio climático.....	40
2.3.1.	Variabilidad hidroclimática	40
2.3.2.	Cambio climático	40
2.3.3.	Escenarios de emisión para cambio climático	40
2.3.4.	Modelos de circulación general (GCM)	43
2.3.5.	Regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú.....	45
2.3.6.	Futuro climático regional para el Perú	46
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1.	Zona de estudio.....	48
3.1.1.	Clima	49
3.1.2.	Agua.....	49
3.1.3.	Suelo.....	49
3.2.	Materiales.....	50
3.2.1.	Material genético.....	50
3.2.2.	Softwares.....	51
3.3.	Metodología.....	52
3.3.1.	Caracterización del clima, suelo, riego y cultivo en la zona de estudio requerida por el modelo agrometeorológico AquaCROP	54
3.3.2.	Calibración y validación de los parámetros del modelo agrometeorológico AquaCROP 60	
3.3.3.	Proyección de la evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única en el periodo 2030 - 2050 para la determinación de los efectos del cambio climático	64
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	68

4.1.	Caracterización del clima, suelo, riego y cultivo	68
4.1.1.	Clima	68
4.1.2.	Cultivo	71
4.1.3.	Suelo.....	74
4.1.4.	Riego	74
4.2.	Calibración y validación de los parámetros del modelo agrometeorológico AquaCROP.....	75
4.2.1.	Cobertura del dosel (CC)	77
4.2.2.	Biomasa aérea seca (BB)	80
4.2.3.	Rendimiento (Y).....	81
4.3.	Proyección de la evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única para el periodo 2030 – 2050 y Evaluación del efecto del cambio climático.....	86
4.3.1.	Efecto del cambio climático en la información climática futura.....	86
4.3.2.	Efecto del cambio climático en las proyecciones de evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única	94
V.	CONCLUSIONES	103
VI.	RECOMENDACIONES	105
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
VIII.	ANEXOS	110

Índice de tablas

Tabla 1:	Características de las rutas representativas de concentración de CO ₂ (RCP) para 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m ² de forzante radiativa.	42
Tabla 2:	Características de la parcela experimental.....	50
Tabla 3:	Softwares utilizados en la investigación.....	51
Tabla 4:	Calificación de la eficiencia de la modelación según el índice de Nash – Sutcliffe (E)	62
Tabla 5:	Características de los seis escenario de cambio climático	64
Tabla 6:	Indicadores estadísticos del ajuste de la evapotranspiración estimada con la ecuación Hargreaves en función de la evapotranspiración estimada por Penman – Monteith para condiciones de La Molina.....	70
Tabla 7:	Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores de evapotranspiración calculados por Penman - Monteith en comparación a los calculados por Hargreaves	70
Tabla 8:	Cobertura del Dosel promedio de los 16 muestreos realizados con 12 repeticiones por muestreo	73
Tabla 9:	Profundidad de raíces con ocho muestreos y dos repeticiones por muestreo, Biomasa aérea con tres muestreos y seis repeticiones por muestreo.....	73
Tabla 10:	Características del suelo requeridas por el modelo AquaCROP.....	74
Tabla 11:	Parámetros calibrados del Modelo AquaCrop para el cultivo de papa, variedad Única, bajo condiciones de La Molina	76
Tabla 12:	Resultados de la prueba T-Student con un nivel de significancia del 5% para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedio de la cobertura del dosel observada con la simulada.	77
Tabla 13:	Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en AquaCROP: Calibración con lámina normal (T ₀) y Validación con lámina reducida (T ₁).....	77
Tabla 14:	Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la biomasa aérea seca en Aquacrop: Calibración con lámina normal (T ₀) y Validación con lámina reducida (T ₁).....	80
Tabla 15:	Comparación entre Biomasa aérea seca (Tn.ha ⁻¹) evaluada en la cosecha (14 de diciembre del 2013) y la simulada por el modelo agrometeorológico Aquacrop para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.....	81
Tabla 16:	Rendimiento en peso fresco promedio de la papa variedad Única (Ton.ha ⁻¹) por cada experimento: Experimento con lámina normal (T ₀) y experimento con lámina reducida (T ₁)	82
Tabla 17:	Comparación del rendimiento en la cosecha llevado a peso seco (14 de diciembre del 2013) y el rendimiento simulado por el modelo Aquacrop	

	para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.....	82
Tabla 18:	Rendimientos simulados por AquaCROP y Rendimientos promedio anual del cultivo de papa, obtenidos del Ministerio de Agricultura y Riego a partir de su página Web (http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult), del Centro Internacional de la Papa y Tesis de la Biblioteca Agrícola Nacional.....	83
Tabla 19:	Resultados de la prueba T-Student con un nivel de significancia del 5% para cuantificar el grado de dependencia de los rendimientos simulados y los rendimientos obtenidos del MINAGRI a partir de su página Web (http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult), para el periodo histórico (1997 – 2007).....	85
Tabla 20:	Diferencia porcentual de la precipitación proyectada promedio mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.....	88
Tabla 21:	Diferencia porcentual de la temperatura máxima proyectada mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto temperatura máxima histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.	91
Tabla 22:	Diferencia porcentual de la temperatura mínima proyectada mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto a la temperatura mínima histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.	93
Tabla 23:	Diferencia porcentual de la evapotranspiración proyectada promedio mensual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico mensual (periodo del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.	96
Tabla 24:	Valores máximos y mínimos del rendimiento simulados con la lámina de riego de 242 mm para el periodo 2030-2050	99
Tabla 25:	Diferencia porcentual del rendimiento simulado para el periodo 2030 - 2050 con respecto al rendimiento simulado para el periodo del año 1997 - 2007.	100
Tabla 26:	Valores máximos y mínimos del rendimiento simulado con la lámina de riego de 292 mm para el periodo 2030-2050	102
Tabla 27:	Diferencia porcentual del rendimiento simulado modificando la lámina de riego para el periodo 2030 - 2050 con respecto al rendimiento simulado para el periodo del año 1997 - 2007.	102

Índice de figuras

Figura 1:	Factores que afectan la evapotranspiración.....	19
Figura 2:	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c) y no estándar (ET _{c_{aj}}).....	21
Figura 3:	Variación del coeficiente de estrés hídrico (K _s), donde: AFD: Agua fácilmente aprovechable, ADT: agua disponible total, FC: Capacidad de campo, WP: Punto de marchites permanente.....	23
Figura 4:	Esquema simplificado del modelo agrometeorológico AquaCrop en el que se resalta la introducción de la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración (Tr); además de la separación del rendimiento (Y) en la biomasa (B), el índice de la cosecha (IC), (a) vincula la biomasa – transpiración y (a') vincula el rendimiento – evapotranspiración del cultivo.	28
Figura 5:	Diagrama de flujo del modelo agrometeorológico AquaCrop, indicando los componentes principales, suelo – planta – atmósfera considerada.....	30
Figura 6:	Interfaz del Modelo Agrometeorológico AquaCROP.	33
Figura 7:	Esquema general de cálculo del Modelo AquaCrop. Las flechas de puntos indican los procesos que se tiene en cuenta, (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 _{ctr} es el coeficiente de transpiración del cultivo, WP* es la productividad hídrica normalizada y IC es el índice de cosecha.	35
Figura 8:	Ejemplo del proceso de simulación de la CD de un cultivo a lo largo de su ciclo sin condiciones de estrés hídrico.....	39
Figura 9:	Variación de la temperatura global proyectado al 2100 para cuatro escenarios de cambio climático. Siendo el escenario con emisiones más bajas el RCP 2.6 (línea azul) y el escenario con emisiones más altas el RCP 8.5 (línea roja)	42
Figura 10:	Variación de la precipitación y temperatura media, entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100: para los escenarios RCP 8.5 (más altos) y RCP 2.6 (más bajos). Izquierda: Variación de temperatura media en la superficie. Derecha: Variación de precipitación media.	43
Figura 11:	Esquema de los de los Modelos Climáticos de Circulación General (GCM)	44
Figura 12:	Puntos azules indican la ubicación de las 265, 105 y 102 estaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.	45
Figura 13:	Proyecciones para precipitación, temperatura máxima y mínima con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000, cada escenario RCP 4.5 en línea sólida y RCP 8.5 en línea punteada.	46
Figura 14:	Área Demostrativa y Área Experimental de Riegos (ADyAER)	48
Figura 15:	Características del periodo vegetativo de la papa	51

Figura 16:	Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio	53
Figura 17:	Medición de la cobertura de dosel.	56
Figura 18:	Procedimiento para la obtención de la biomasa seca	57
Figura 19:	Diseño experimental de la investigación	59
Figura 20:	Variabilidad diaria de la Precipitación, T max, T min, Humedad Relativa, Velocidad de viento, Radiación y Evapotranspiración para el periodo de desarrollo del estudio: 31 de agosto al 14 de diciembre de 2013	68
Figura 21:	Correlación lineal de la evapotranspiración estimada por Hargreaves y Penman – Monteith para condiciones de La Molina. Periodo de análisis: Del 01 de enero al 31 de diciembre del 2013	70
Figura 22:	Etapas del cultivo a lo largo del periodo vegetativo	71
Figura 23:	Variación del coeficiente del cultivo dual Kc dual línea verde, coeficiente basal del cultivo Kcb línea azul y coeficiente de evaporación línea roja, durante el desarrollo del cultivo papa variedad Única, bajo riego por goteo, en el periodo de Agosto a Diciembre del 2013	72
Figura 24:	Precipitación diaria y eventos de riego durante el período vegetativo del cultivo. (T ₀ lámina normal, T ₁ lámina reducida).....	74
Figura 25:	Variación temporal de la cobertura del dosel (%): Valores simulados por el modelo en línea azul, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con un total de 196 muestras por experimento: Experimento con lámina normal (a) y experimento con Lámina reducida (b). El boxplot representa el rango intercuartil, 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.....	79
Figura 26:	Variación temporal de la Biomasa seca por encima del nivel del suelo (Tn.ha ⁻¹): Valores simulados por el modelo en línea celeste, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con un total de 15 muestras por experimento: Experimento con lámina normal (a), experimento con lámina reducida (b). El boxplot representa el rango intercuartil, 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	80
Figura 27:	La puntos naranja, verde, morado, marrón y negro representan los rendimientos obtenidos del MINAGRI (1997 – 2007), CIP (2006, 2012 y 2013), Rojas (2007), Yactayo (2011) y Meza (2013) respectivamente. La línea celeste representa los rendimientos simulados por AquaCROP (1997 – 2007), y los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos simulados para la calibración y validación del Modelo AquaCROP en la campaña de estudio 2013.	85
Figura 28:	Diagrama de barras de la precipitación de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la precipitación mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.	87

- Figura 29: Proyecciones absolutas de precipitación acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la precipitación anual histórica del periodo 1997-2007. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. La franja ploma vertical marca el fin entre la precipitación histórica y el inicio de las proyecciones.89
- Figura 30: Diagrama de barras de la temperatura máxima de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la temperatura máxima mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.90
- Figura 31: Diagrama de barras de la temperatura mínima de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la temperatura mínima mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.92
- Figura 32: Diagrama de barras de la evapotranspiración de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la evapotranspiración mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.95
- Figura 33: Proyecciones absolutas de evapotranspiración acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la evapotranspiración anual histórica del periodo 1997-2007. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. La franja ploma vertical señala el fin de la evapotranspiración histórica y el inicio de las proyecciones.97
- Figura 34: Proyecciones de rendimiento en peso fresco del cultivo de papa Variedad Única para el periodo 2030-2050 con respecto a los rendimientos en peso fresco simulados para periodo 1997-2007, en celeste. Las líneas continuas corresponden al escenario RCP4.5 y discontinuas al escenario RCP8.5. Los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos en peso fresco simulados para la calibración y validación respectivamente en el periodo 2013. La franja ploma vertical señala el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.99
- Figura 35: Proyecciones de rendimiento en peso fresco del cultivo de papa Variedad Única para el periodo 2030-2050 con respecto a los rendimientos en peso fresco simulados del periodo 1997-2007, en celeste. Las líneas continuas corresponden al escenario RCP4.5 y discontinuas al escenario RCP8.5. Los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos en peso fresco simulados para la calibración y validación respectivamente en el periodo 2013. La franja ploma vertical señala el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.101

Índice de anexos

Anexo 1	Resultados de la simulación para la calibración periodo 2013	110
Anexo 2	Resultados de la simulación para la validación periodo 2013.....	111
Anexo 3	Resultados del análisis de agua de riego aplicada al campo experimental obtenido del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de La UNALM	112
Anexo 4	Valores de cobertura del dosel evaluados durante el periodo vegetativo del cultivo comparados con valores simulados por Aquacrop mediante r Pearson.....	113
Anexo 5	Estaciones con proyecciones climáticas para la interpolación	115
Anexo 6	Precipitación histórica para el periodo 1997 – 2007, obtenida de la estación meteorológica Von Humboldt	116
Anexo 7	Temperatura máxima mensual histórica para el periodo 1997 – 2007, obtenida de la estación meteorológica Von Humboldt	117
Anexo 8	Temperatura mínima mensual histórica para el periodo 1997 – 2007, obtenida de la estación meteorológica Von Humboldt	118

I. INTRODUCCION

Los efectos de cambio climático están afectando la distribución y cantidad de lluvia, debido a ello la disponibilidad de agua es cada vez más escasa para la agricultura, además el incremento de la temperatura y con ello el incremento de la evapotranspiración, podrían afectar el rendimiento de los cultivos, y por tanto, ocasionarán pérdidas en la economía familiar de los agricultores. Todo esto, aunado al crecimiento poblacional y por consiguiente a una mayor demanda de alimentos, origina la búsqueda de nuevas tecnologías y maneras apropiadas de producir alimentos utilizando y aprovechando los recursos disponibles con un alto grado de eficiencia y de manera sostenible.

En el caso de la papa de variedad “Única” genéticamente es tolerante al calor y sequía. Por un lado, para resolver las limitaciones del recurso hídrico que es poco disponible en la costa peruana se debe aplicar solo el requerimiento necesario de la planta para obtener una productividad óptima. El modelo AquaCrop “Crop-model to simulate yield response to water” de la FAO (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) permite simular el rendimiento del cultivo a través de un modelo de productividad del agua que simula la producción de biomasa en base a la cantidad de agua transpirada de la cobertura vegetal. El agua, la temperatura, la fertilidad, pueden provocar estrés en la planta que resulta en una menor transpiración. Ante esto el modelo Aquacrop permite optimizar el rendimiento del cultivo y es particularmente adecuado para hacer frente a las condiciones donde el agua y temperatura son factores claves limitantes de la producción (FAO, 2012).

Por lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo general determinar el efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa variedad “Única” ante seis escenarios de cambio climático bajo condiciones de La Molina, para lo cual será necesario cumplir los siguientes objetivos específicos: Caracterizar el clima, suelo, riego y cultivo en la zona de estudio requerida por el modelo agrometeorológico AquaCROP, calibrar y validar el modelo agrometeorológico AquaCROP y finalmente proyectar la evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única en el periodo 2030 – 2050, para determinar los efectos del cambio climático.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración (ET) según Allen, et al. (2006), es la combinación de dos procesos separados, por un lado, el agua se pierde de la superficie del suelo mediante la evaporación y por otro lado, de los cultivos mediante la transpiración. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay manera fácil de distinguir entre los dos procesos. Cuando el cultivo es pequeño, el agua se pierde predominantemente por la evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo está bien desarrollado y cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. Además de la disponibilidad de agua en la capa superior del suelo, la evaporación de un suelo cultivado se determina principalmente por la fracción de la radiación solar que llega a la superficie del suelo, esta fracción disminuye a lo largo del periodo de crecimiento ya que el cultivo se desarrolla y las sombras del dosel del cultivo son cada vez más grandes que el área del suelo desnudo.

El concepto de necesidades hídricas está íntimamente conectado con la evapotranspiración del cultivo debido a que ambos se refieren a la misma cantidad de agua; sin embargo existen algunas diferencias entre ellos; la evapotranspiración representa la pérdida de agua que se produce en un determinado cultivo y las necesidades de agua, representa la cantidad de agua que debería ser suministrada al cultivo para contrarrestar estas pérdidas, de hecho, esta cantidad de agua corresponde a la de suministro de agua de riego efectiva necesaria para alcanzar el rendimiento máximo (Immerzeel, 2008).

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo, esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un completo periodo de cultivo o un año.

Evaporación (E)

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (eliminación de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, pavimentos, suelos y la vegetación húmeda (Allen, et al. 2006).

Para cambiar el estado de las moléculas de agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmosfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmosfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de evaporación (Gangopadhyaya, 1965).

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación (Pereira, et al. 1999).

Transpiración (T)

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y la eliminación de vapor a la atmosfera. Predominantemente, los cultivos pierden su agua a través de los estomas, que son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través del cual pasan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmosfera (Allen, et al. 2006).

El agua junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmosfera es controlada por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura, la humedad atmosférica y el viento también deben

ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego (Pereira, et al. 1999).

La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (Allen, et al. 2006).

2.1.1. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los principales factores que afectan la E y la T, como se muestra en la Figura 1, son las variables climáticas, las características del cultivo, el manejo y las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo.

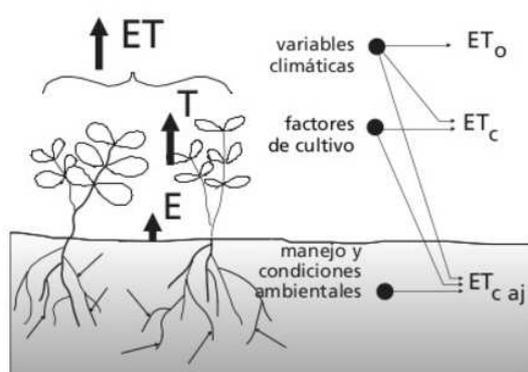


Figura 1: Factores que afectan la evapotranspiración

Fuente: Allen, et al. (2006)

a. Variables climáticas:

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Gong, et al. 2006).

b. Factores de cultivo:

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas (Allen, et al. 2006).

c. Manejo y condiciones ambientales:

Los factores tales como la salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables de suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo (Gong, et al. 2006).

Según Allen, et al. (2006), el efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

2.1.2. CONCEPTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones; evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) (Figura 2).

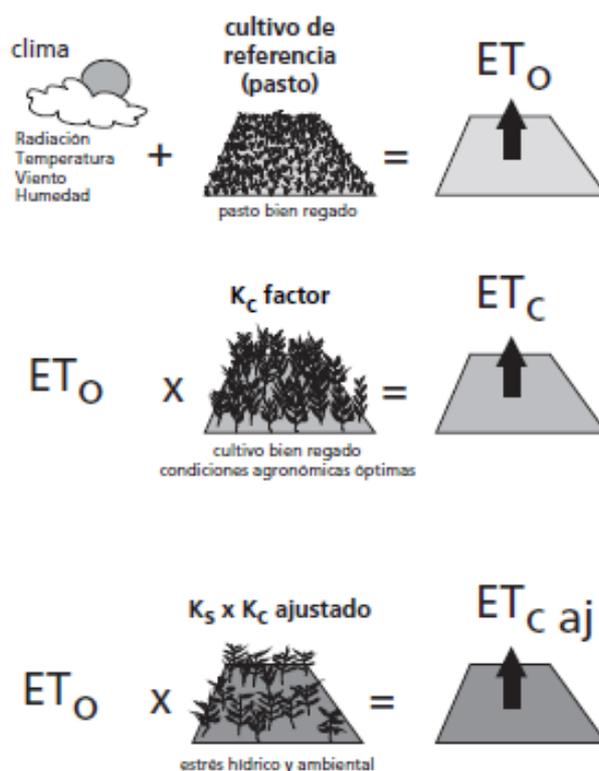


Figura 2: Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y no estándar ($ET_{c_{aj}}$)

Fuente: Allen, et al. (2006)

a. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o):

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia (Irmak y Haman, 2003).

Los únicos factores que afectan ET_0 son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_0 es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_0 expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ET_0 de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos climáticos faltantes (Allen, et al. 2006).

b. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c):

Según Allen, et al. (2006), la ET_c se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes. En la ecuación 1, se muestran las variables implicadas en la estimación de la ET_c bajo condiciones estándar.

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración (Jensen et al., 1990).

Coeficiente de cultivo (K_c):

El coeficiente del cultivo (K_c) integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de K_c . Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán el valor de K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c (Allen, et al. 2006). Entre los factores que afectan el valor del coeficiente de cultivo están: Tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo y las etapas del crecimiento del cultivo.

c. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferente a las condiciones estándar de ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y básicamente limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c , en la Ecuación 2 se muestran las variables que intervienen en su cálculo (Allen, et al. 2006).

$$ET_c = K_c \cdot K_s \cdot ET_o \quad (2)$$

Coeficiente de estrés hídrico (K_s):

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor de la evapotranspiración del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral (Figura 3), se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s . Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$ (Allen, et al. 2006).

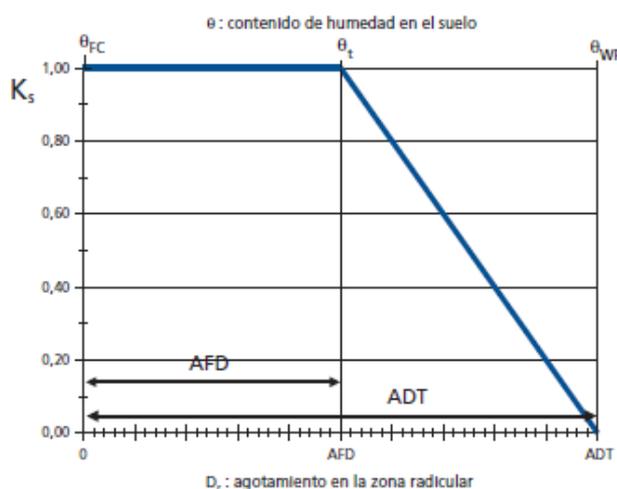


Figura 3: Variación del coeficiente de estrés hídrico (K_s), donde: AFD: Agua fácilmente aprovechable, ADT: agua disponible total, FC: Capacidad de campo, WP: Punto de marchites permanente

Fuente: Allen, et al. (2006)

2.1.3. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Evapotranspiración del cultivo se puede determinar por mediciones y estimaciones. En general, las mediciones se llevan a cabo en las estaciones agro-meteorológicas y sitios experimentales con la finalidad de ser utilizados para evaluar los procedimientos de estimación y para calibrar los parámetros de los métodos de estimación (Immerzeel, 2008).

a. Lisímetro

Si se aísla la zona radicular del cultivo se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo que pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ET_c y K_c . Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos de investigación (Abtew y Obeysekera, 1995).

En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimas de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y periodos pequeños tales como una hora. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un periodo dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada (Canales, 2009).

b. Tanque evaporímetro tipo A

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ET_o (Allen, et al. 2006).

c. Penman – Monteith

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, la ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia. La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la ET_c con la ET_o (Allen, et al. 2006).

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia (Allen, et al. 2006).

El método Penman-Monteith (Ecuación 3) fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Irmak y Haman, 2003).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0.34\mu_2)} \quad (3)$$

Dónde: ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm.día^{-1}); R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJm}^{-2}.\text{día}^{-1}$); G : Flujo de calor de suelo ($\text{MJm}^{-2}.\text{día}^{-1}$); T : Temperatura media del aire a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$); μ_2 : Velocidad de viento a 2m de altura (m.s^{-1}); e_s : Presión de vapor de saturación (kPa); e_a : Presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa); Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa. }^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : Constante psicrométrica ($\text{kPa. }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

d. Hargreaves

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para evaluar la Evapotranspiración Potencial necesita solamente datos de temperaturas y de Radiación Solar.

La expresión general es la siguiente:

$$ET_o = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s \quad (4)$$

Dónde: ET_o = evapotranspiración potencial diaria, (mm/día); t_{med} = temperatura media, (°C), R_s = radiación solar incidente, (mm/día).

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); R_0 es obtenida en tablas en función de la latitud del lugar y del mes.

Obtención de la Radiación Solar Incidente (R_s):

Samani (2000) propone la siguiente fórmula:

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (5)$$

Dónde: R_s = Radiación solar incidente, (mm/día); R_0 = Radiación solar extraterrestre (tabulada); KT = coeficiente; t_{max} = temperatura diaria máxima, (°C); t_{min} = temperatura diaria mínima, (°C).

Puesto que los valores de R_0 están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión la encontramos en el coeficiente KT .

El coeficiente KT de la expresión es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves (citado en Samani, 2000) recomienda $KT = 0,162$ para regiones del interior y $KT = 0,19$ para regiones costeras.

2.2. MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

Aquacrop es un modelo descriptivo que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua. También estima el rendimiento de cultivos herbáceos donde se incluyen forrajes, vegetales, frutas, aceite, raíces y tubérculos. Este modelo fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO y simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de lluvia y/o riego en el suelo; este modelo es muy útil cuando el agua es el factor limitante. Adicionalmente permite determinar épocas de siembra óptimas de acuerdo a condiciones de clima, suelos, cultivo y manejo agronómico. El motor del este modelo es el agua en donde la transpiración es trasladada dentro de la biomasa por medio de un parámetro denominado la productividad de agua que es la relación entre la biomasa producida en un metro cuadrado por un milímetro transpirado (Raes, et al. 2009).

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 no productivo y 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. Los cambios descritos se pueden representar en la Ecuación 6 (Raes, et al. 2009).

$$B = WP \sum Tr \quad (6)$$

Donde Tr es la transpiración del cultivo (mm) y WP es el parámetro de productividad hídrica ($\text{Kg}_{\text{biomasa}} \cdot \text{m}^{-2}$ y por mm de agua transpirada sobre el período de tiempo en el cual la biomasa es producida).

AquaCrop utiliza además un número relativamente pequeño, explícito e intuitivo de parámetros y variables de entrada que requieren métodos relativamente sencillos para su determinación. Los usos de AquaCrop van desde la evaluación de los recursos hídricos

necesarios, para alcanzar los rendimientos de los cultivos en un determinado lugar geográfico, hasta apoyar la toma de decisiones sobre la asignación del agua y otras acciones de la política del agua.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

El corazón del modelo AquaCrop es representado por la Figura 4, en ésta, aunque se presenta como punto central el proceso la radiación solar, no es considerada directamente sino dentro de la determinación de la evapotranspiración de referencia ETo el cual es un procedimiento que debe realizarse en forma externa al modelo, y se suministra como variable de entrada. Sin embargo, el verdadero motor del modelo es la productividad hídrica (WP) la cual es la base de la determinación de los procesos presentados en la Figura 4 para la determinación de la producción de biomasa con base en la transpiración del cultivo.

El continuo integrado de suelo, planta, atmósfera es considerado en el modelo con la determinación del balance hídrico del suelo, los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta y en consecuencia la obtención de la biomasa y el rendimiento de la cosecha.

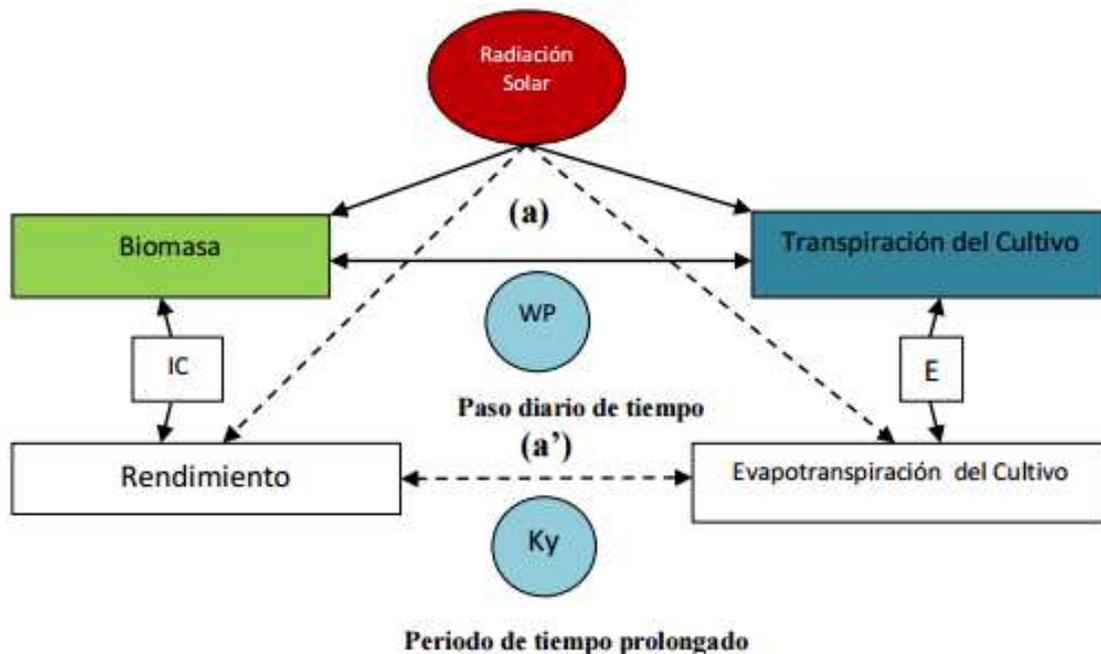


Figura 4: Esquema simplificado del modelo agrometeorológico AquaCrop en el que se resalta la introducción de la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración (Tr); además de la separación del rendimiento (Y) en la biomasa (B), el índice de la cosecha (IC), (a) vincula la biomasa – transpiración y (a') vincula el rendimiento – evapotranspiración del cultivo.

Fuente: Raes, et al. (2009).

Además son considerados dentro del modelo el régimen de precipitación y el régimen termal, 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.

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 de Doorenbos y Kassam, (1979). Representados en la Figura 4 por la variable de constante de productividad del cultivo (K_y) en donde los resultados eran obtenidos al final del ciclo del cultivo.

La Figura 5 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 por lo tanto la productividad hídrica normalizada (WP^*) que conlleva a la generación de la biomasa producida (B) y el índice de cosecha (IC) y por lo tanto del respectivo rendimiento. El dosel representa la proporción de la transpiración real que consigue obtener biomasa a través de la productividad hídrica (WP). Por lo cual, la cosecha, que es determinada por el rendimiento (Y), es calculada a partir de la proporción de la biomasa con base en el índice de cosecha mediante la Ecuación 7 (Raes, et al. 2009).

$$Y = B * IC \quad (7)$$

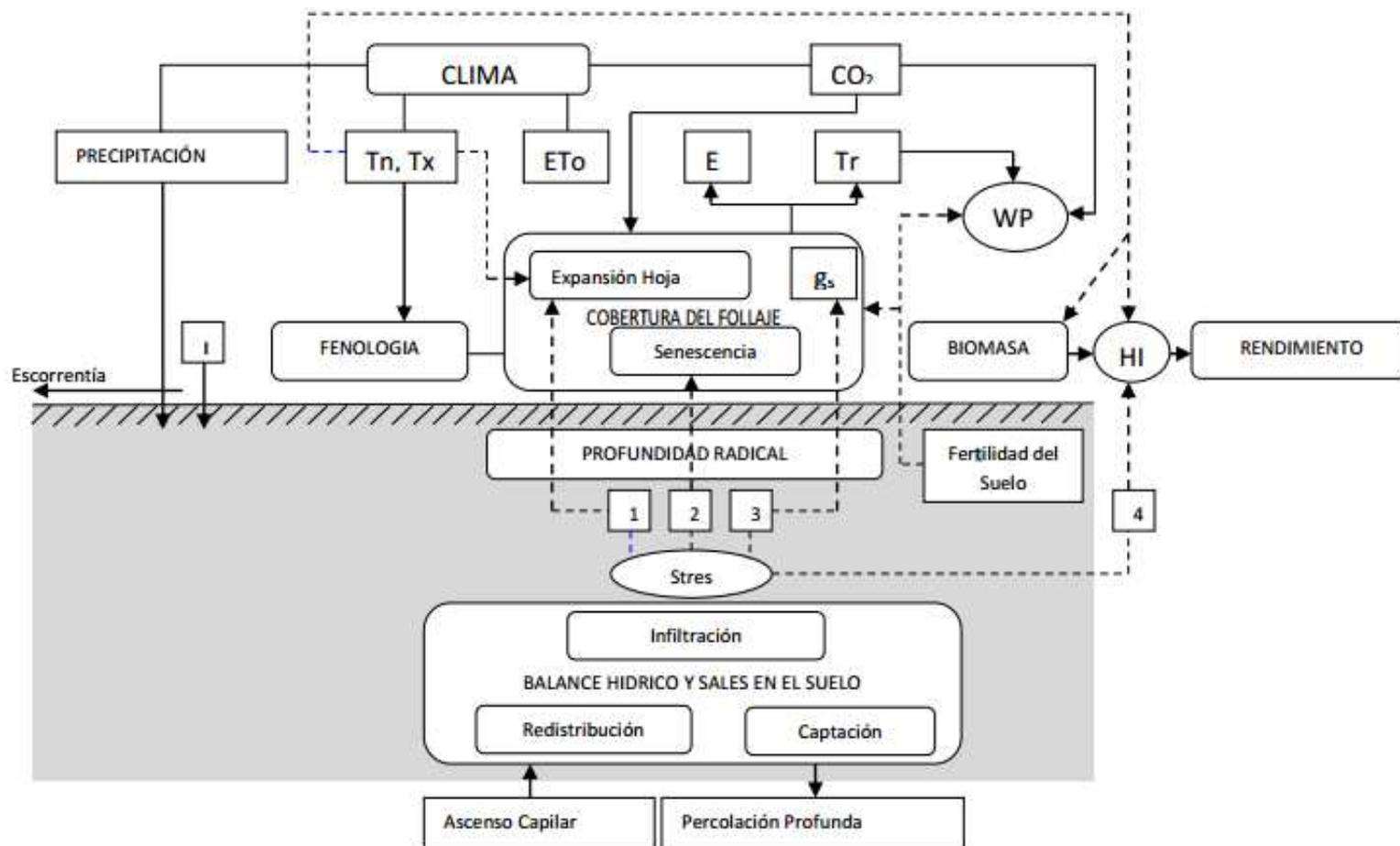


Figura 5: Diagrama de flujo del modelo agrometeorológico AquaCrop, indicando los componentes principales, suelo – planta – atmósfera considerada.

Fuente: Raes, et al. (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, et al. 2009).

El CO₂, presente en la atmósfera va a contribuir a la expansión de la hoja y a la productividad hídrica. El incremento del CO₂ 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, et al. 2009).

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 estresado valores desde uno hasta cero respectivamente (Raes, et al. 2009).

2.2.2. VENTAJAS DEL MODELO

El modelo AquaCrop marca un cambio sensible en la determinación de la biomasa y la producción agrícola de los cultivos herbáceos por tres aspectos fundamentales:

- En primer lugar 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), con lo cual se obtiene 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 (Steduto, et al. 2009).

- Otra ventaja del modelo es representada por 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 (Steduto, et al. 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 (Steduto, et al. 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 (Steduto, et al. 2009).
- Desde el punto de vista operativo la ventaja del modelo reside en que los parámetros y variables de entrada al modelo son mucho más reducidos que los requeridos para la mayoría de los modelos de su clase orientados a la obtención de la biomasa y la determinación de los volúmenes de producción. Además las variables requeridas en su mayoría son mucho más sencillas e intuitivas de obtener.
- Para la determinación de los desarrollos de la biomasa sobre el suelo y su incidencia en la evapotranspiración real del cultivo, se ha trabajado tradicionalmente por la mayoría de los modelos existentes, con la supervisión del Índice de Área Foliar (IAF), el cual es en general dispendioso en su determinación. Sin embargo, AquaCrop ya no requiere de éste índice, pues en su lugar se establece el seguimiento de la cobertura vegetal, la cual es muy sencilla en su determinación por medios fotográficos y puede incorporarse en un futuro a gran escala con el uso de los sensores remotos y los sistemas de información geográficos (SIG).
- El modelo se centra en el agua porque es un motor clave de la producción agrícola, y porque el progresivo crecimiento de la población humana, el aumento de la

industrialización y el nivel de vida en todo el mundo están exigiendo una mayor participación de nuestros recursos hídricos limitados, el agua es cada vez más un factor crítico que limita la producción de los cultivos. Además, la respuesta del cultivo al déficit hídrico sigue siendo una de las respuestas más difíciles de captar en el modelamiento de los cultivos, así como la variación del déficit hídrico en intensidad, duración y momento de ocurrencia. (Hsiao, 1973; Hsiao, et al. 1976; Bradford y Hsiao, 1982).

2.2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

En la Figura 6 se presenta la interfaz principal de AquaCrop en la que se observan los módulos disponibles para realizar la simulación. En la parte superior, en el encabezado “Environment and Crop”, se encuentran los cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelo. Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros.

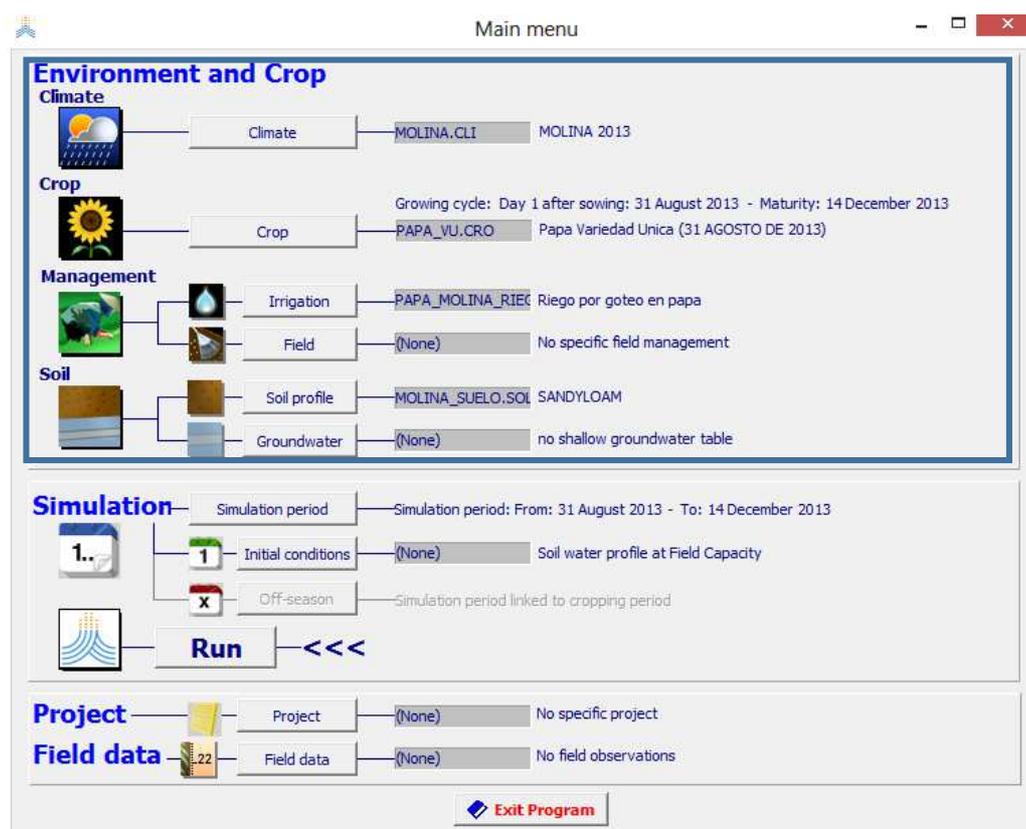


Figura 6: Interfaz del Modelo Agrometeorológico AquaCROP.

A continuación se describen algunos de estos parámetros. En paréntesis después del nombre del parámetro se encuentra el módulo al cual pertenece cada parámetro en el modelo:

- Fecha de siembra (Cultivo): este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo.
- 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.
- Cobertura del dosel máximo, CCx (Cultivo): Este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del dosel bajo condiciones óptimas.
- 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.
- Índice de Cosecha (Cultivo): La partición de la biomasa en la porción de rendimiento se simula mediante el índice de cosecha (HI). 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.
- 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).
- 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, et al. 2012).

2.2.4. ESQUEMA DE CÁLCULO DE AQUACROP

Un esquema general de cálculo de AquaCrop se representa en la Figura 7. Con un paso de tiempo diario el modelo simula sucesivamente los siguientes procesos:

a. Balance hídrico del suelo.

La cantidad de agua almacenada en la zona de la raíz es simulada por la contabilidad de los flujos de agua entrantes y salientes en sus límites. El agotamiento en la zona radicular determina la magnitud de un conjunto de coeficientes de estrés hídrico (K_s) que afecta a: (a) La expansión de la cobertura de copas (CC) de la planta verde, (b) la conductancia estomática y por lo tanto la transpiración (T_r) por unidad de CC, (c) la senescencia de la copa de la planta y descenso, (d) el índice de cosecha (HI) y (e) el índice de profundidad del sistema radicular (Raes, et al. 2009).

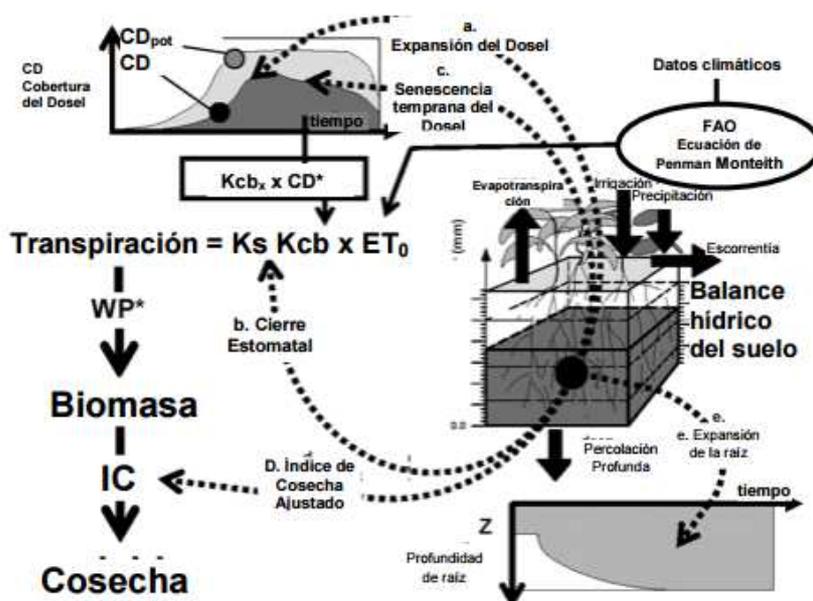


Figura 7: Esquema general de cálculo del Modelo AquaCrop. Las flechas de puntos indican los procesos que se tiene en cuenta, (desde a hasta e) y que afectan el estrés hídrico. CD^* es la cobertura del dosel, CD_{pot} es la cobertura del dosel potencial, K_s es el coeficiente de estrés hídrico, IC es el índice de cosecha, K_{ctr} es el coeficiente de transpiración del cultivo, WP^* es la productividad hídrica normalizada y IC es el índice de cosecha.

Fuente: Raes, et al. (2009)

b. El desarrollo del cultivo

En la simulación de desarrollo de los cultivos, la expansión de copa es separado de la expansión de la zona de la raíz. La interdependencia entre el retoño y la raíz es indirecta a través de la escasez de agua. AquaCrop utiliza la cobertura de copas para describir

desarrollado del cultivo. El dosel o copa es una característica crucial de AquaCrop. A través de su expansión, envejecimiento, la conductancia y la senescencia, que determina la cantidad de agua transpirada (Tr), que a su vez determina 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)

Transpiración del cultivo se obtiene multiplicando la potencia de evaporación de la atmósfera (E_{To}) con un coeficiente de cultivo. El coeficiente de cultivo (K_{cb}) es proporcional a CC y por lo tanto ajustado continuamente. La energía de evaporación se expresa la evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}) determinado según la ecuación de la FAO Penman-Monteith. Si el estrés hídrico induce el cierre de estomas, el coeficiente de estrés hídrico de la conductancia estomática (K_s) reduce 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)

La cantidad de agua transpirada (Tr) acumulada se traduce en una 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)

Dada 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).

2.2.5. SIMULACIÓN DE LOS DESARROLLOS AGRONÓMICOS DEL CULTIVO

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.

a. Desarrollo del dosel

El desarrollo de la cobertura del dosel es una característica esencial de AquaCrop (Steduto, et al. 2009). El proceso de crecimiento del dosel incluye: la expansión, el desarrollo completo, el envejecimiento, y la posterior senescencia o muerte. Establece la cantidad de biomasa producida, y también la conductancia estomática, que determina la cantidad de agua transpirada.

El crecimiento del dosel depende de la cantidad real del follaje que puede producir la fotosíntesis, siguiendo una conducta de crecimiento que tiene una tasa relativamente constante (Hsiao, 1973; citado por Steduto, et al. 2009; Bradford y Hsiao, et al. 1982). Esto condujo al uso de una ecuación de crecimiento exponencial para simular el desarrollo del dosel para la primera mitad de la curva de crecimiento bajo condiciones no estresadas:

$$CD = CD_0 e^{CCD*t} \quad (8)$$

Dónde: CD : Cobertura del dosel en el tiempo, t , [% decimal]; CD_0 : Tamaño inicial del dosel (a 90% de emergencia, en $t = 0$), [% decimal]; CCD : Coeficiente de crecimiento del dosel [%·día⁻¹, o fracción·día⁻¹].

Es importante mencionar que la CD_0 es proporcional a la densidad de siembra y depende de la medida inicial del tamaño del dosel por plántula, por lo cual, esta característica es tenida en cuenta por el modelo para usarla de acuerdo a las variaciones en la densidad de siembra. Se deduce entonces que la CD_0 se obtiene multiplicando la densidad de plantas y el tamaño promedio del dosel de las plántulas en el momento de la aparición del 90% de la emergencia. Steduto et al., (2009) mencionan que el valor de la cobertura de una semilla individual (C_s) ya ha sido evaluado para un conjunto de cultivos y se encontró que es una variable conservativa. Lo que se quiere es tener valores de C_s bien probados para la mayoría de los cultivos, con el objeto de establecerlos dentro de AquaCrop, de tal forma que el usuario tenga

sólo que entrar la densidad de siembra. Sin embargo, se espera que sean necesario pequeños ajustes para variedades específicas.

Para la segunda mitad de la curva de CD , debido a que las plantas empiezan a sombrearse y traslaparse una a otras cada vez más, el crecimiento del dosel ya no será proporcional al tamaño actual del dosel. Por lo cual, AquaCrop propone un decaimiento exponencial de la forma:

$$CD = CD_x - 0.25 \frac{(CD_x)^2}{CD_0} e^{-tCCD} \quad (9)$$

Donde CD_x : Cobertura del Dosel máxima para unas condiciones óptimas [% o fracción].

En la fase de desarrollo del dosel el tamaño de éste puede ser fácilmente modulado por el estrés hídrico ya que el crecimiento de la hoja es muy sensible al estrés hídrico, y puede ser más lento incluso cuando una pequeña fracción del agua disponible en el suelo sea consumida, es decir, en el umbral superior del coeficiente de estrés hídrico para expansión del crecimiento ($K_{s_{exp}}$) el cual alcanza un valor bajo de ρ . AquaCrop calcula este efecto por medio de la ecuación:

$$CCD_{ajust} = K_{s_{exp}} CCD \quad (10)$$

Dónde: CCD_{ajust} : Coeficiente de crecimiento del dosel ajustado por estrés hídrico, [Adim];
 $K_{s_{exp}}$: Coeficiente de estrés hídrico para expansión de crecimiento del dosel, varía de 1 a 0; [Adim].

Cuando se presenta la madurez del cultivo, la CD entra en una fase de declinación debido a la senescencia foliar. Esta etapa es descrita por AquaCrop por medio de la ecuación:

$$CD = CD_x [1 - 0,05 \left(\exp^{\frac{CDD}{CD_x} t} - 1 \right)] \quad (11)$$

Dónde: CDD : Coeficiente de declinación del dosel, [%·día-1, fracción·día-1, o %·día-1°C-1];
 t : Tiempo desde el inicio de la senescencia del dosel, [días].

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la simulación de un cultivo determinado por AquaCrop con la implementación de los tres coeficientes y las tres Ecuaciones (8, 9 y 11) usadas para este proceso.

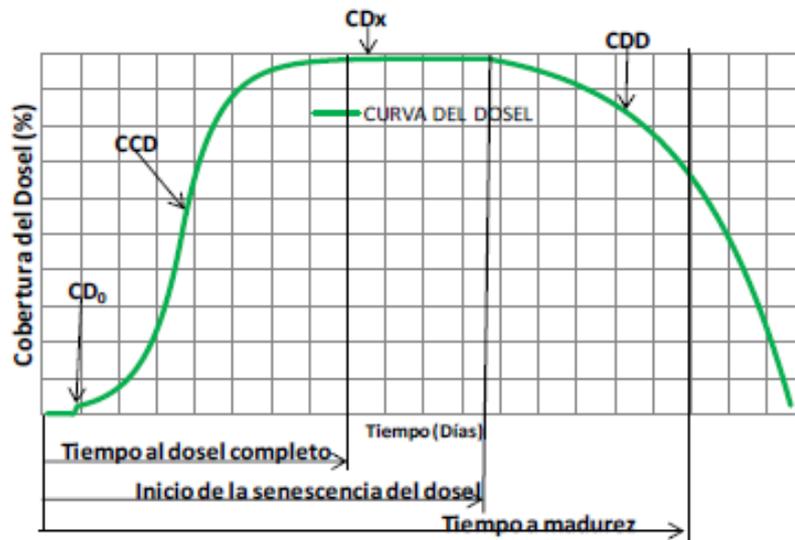


Figura 8: Ejemplo del proceso de simulación de la CD de un cultivo a lo largo de su ciclo sin condiciones de estrés hídrico.

Fuente: Steduto, et al. (2009).

b. Expansión de la zona de raíces

La profundidad radical ha sido la variable clave para la estimación del balance hídrico en el cultivo, por esta razón AquaCrop simula la profundidad efectiva de la raíz (PER) y el patrón de extracción de agua.

La profundidad efectiva de la raíz se define como la profundidad donde la raíz puede absorber el agua. El patrón de extracción de agua del suelo por las plantas estándar del Soil Conservation Service, (1991), el cual es implementado por defecto en AquaCrop, éste divide la profundidad efectiva en cuartos y porcentajes de 40, 30, 20 y 10%, los cuales son asignados desde el cuarto superior hacia abajo, sin embargo dichos porcentajes pueden ser cambiados por el usuario. La manera como la profundidad efectiva de la raíz crece es descrita por AquaCrop de acuerdo a la Ecuación 12:

$$Z = Z_0 + (Z_x - Z_0) \sqrt[n]{\frac{(t - t_0)}{(t_x - t_0)}} \quad (12)$$

Dónde: Z : Profundidad efectiva de raíces en el tiempo t , [m]; Z_0 : Profundidad inicial, [m]; Z_x : Máxima profundidad efectiva de raíces, [m]; t_0 : Tiempo para alcanzar la emergencia del cultivo, [día o día.°C]; t_x : Tiempo después de plantación cuando Z_x es alcanzado, [día o día.°C]; t : Tiempo después de plantación [día o día.°C]; n : Factor de forma, [Adim].

2.3. CAMBIO CLIMÁTICO

2.3.1. VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA

Según Pabón (2011), la Variabilidad Climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. 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.

2.3.2. CAMBIO CLIMÁTICO

Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras.

Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define ‘cambio climático’ como: ‘un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales (IPCC, 2001).

2.3.3. ESCENARIOS DE EMISIÓN PARA CAMBIO CLIMÁTICO

Un escenario climático futuro 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, 2007).

El uso de múltiples escenarios y modelos climáticos han permitido describir una amplia gama de posibles evoluciones futuras del clima de la Tierra. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las rutas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés), cabe señalar que algunos nuevos RPC pueden contemplar efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI, a diferencia de los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES, de sus siglas en inglés). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas en el 2100 respecto al día de hoy, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI. En este nuevo tipo de escenarios se han definido fijar los niveles de forzantes radiactivas hacia el año 2100, en vez de considerarse ciertos niveles futuros de emisión de GEI. La forzante radiactiva (FR) se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que se entrega de vuelta al espacio, lo que implica que si la diferencia es positiva se tendrá calentamiento, producto de la acumulación de energía en la superficie terrestre. La FR total para el año 2100 varía desde 2.6 a 8.5 W/m², tal como se aprecia en la Tabla 1. De igual modo se observa según el tipo de RCP un cambio de temperatura superficial media muy significativa, con rangos desde 0.4°C hasta 2.6°C para el periodo de 2046 -2065 y de 0.3°C hasta 4.8°C para el periodo de 2081-2100.

Según el Quinto informe de evaluación del IPCC (2013), cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero 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 9, 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).

Tabla 1: Características de las rutas representativas de concentración de CO₂ (RCP) para 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m² de forzante radiativa.

RCP	Forzante Radiativa	Tendencia de la Forzante Radiativa	[CO ₂] al 2100	Rango probable para el cambio de temperatura 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)

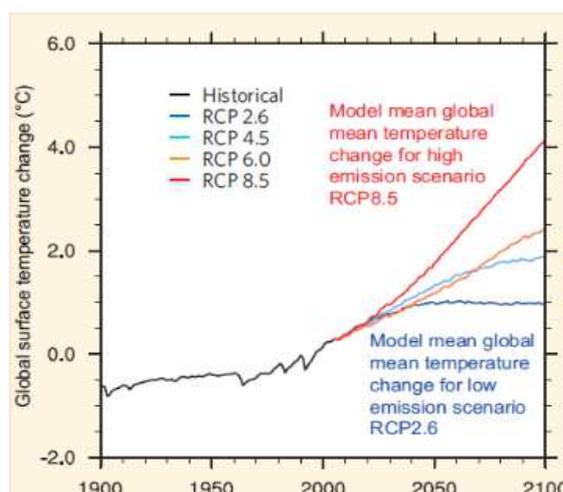


Figura 9: Variación de la temperatura global proyectado al 2100 para cuatro escenarios de cambio climático. Siendo el escenario con emisiones más bajas el RCP 2.6 (línea azul) y el escenario con emisiones más altas el RCP 8.5 (línea roja)

Fuente: IPCC (2013)

De acuerdo a la Figura 10 (izquierda), se visualiza que en la mayoría de las regiones habrá más episodios relacionados con extremos de altas temperaturas y menos relacionados con extremos de bajas temperaturas, causando que la tierra se va a calentar más rápido que el océano, y el Ártico se calentará más rápido que los trópicos. Por otro lado, de acuerdo a la misma Figura 10 (derecha), se observa que el contraste en la precipitación estacional media entre las regiones secas y húmedas aumentará en la mayor parte del globo. Las regiones situadas en latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial verán incrementarse sus precipitaciones.

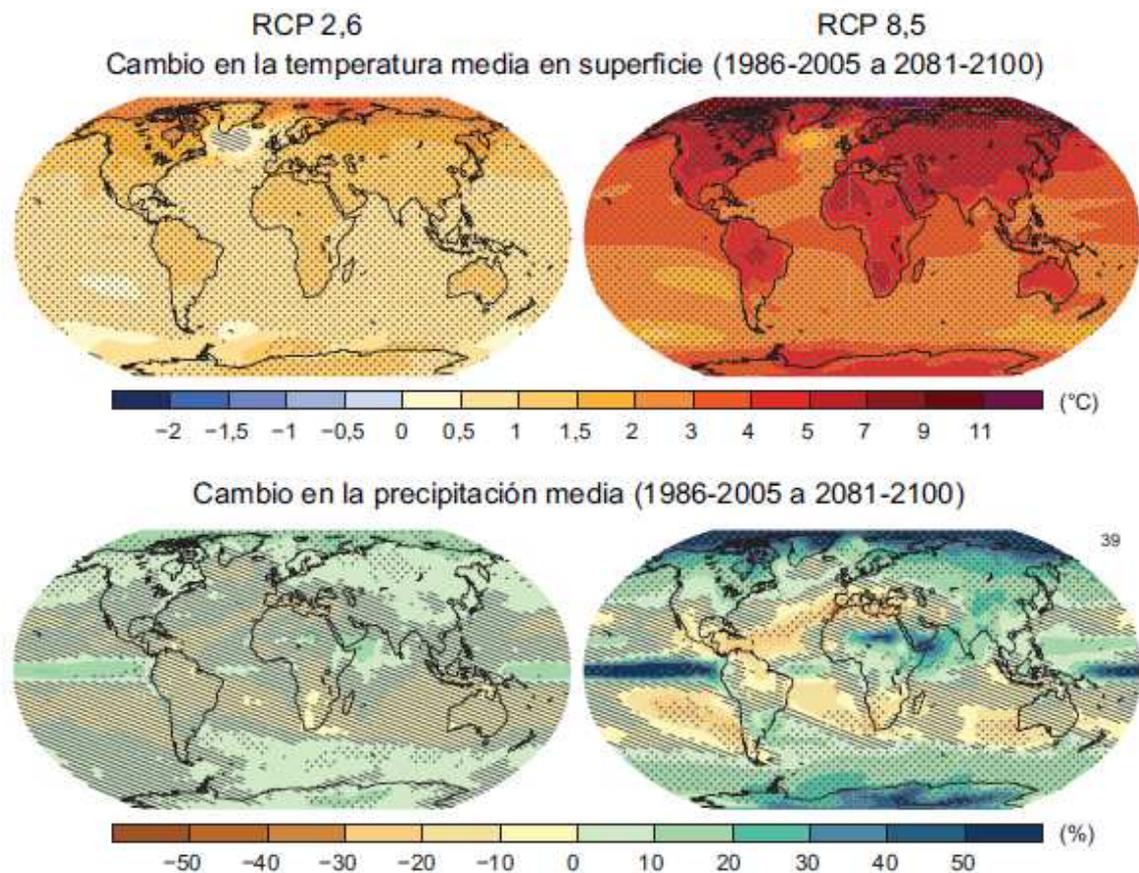


Figura 10: Variación de la precipitación y temperatura media, entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100: para los escenarios RCP 8.5 (más altos) y RCP 2.6 (más bajos). Izquierda: Variación de temperatura media en la superficie. Derecha: Variación de precipitación media.

Fuente: IPCC (2013)

Por consiguiente, el aumento en las forzantes radiactivas para las próximas décadas y decenios hace imperante la necesidad de modelar los posibles efectos a nivel hidrológico y la consecuente modificación en la disponibilidad de recursos hídricos en las cuencas a nivel global, herramientas necesarias en la gestión y explotación de los recursos hídricos en el mediano y largo plazo.

2.3.4. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM)

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

Estos modelos tienen como resultados series de tiempo de variables meteorológicas como temperatura y precipitación. Para ello, los GCM representan procesos físicos en la atmósfera, criósfera y superficie terrestre; utilizando una grilla tridimensional del globo, con resoluciones horizontales típicas del orden de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, llegando incluso a 30 capas en el océano (ver Figura 11). La grilla es por tanto bastante gruesa, siendo imposible de modelar los procesos que ocurren a menores escalas (como formación de nubes y procesos hidrológicos a nivel de cuenca).

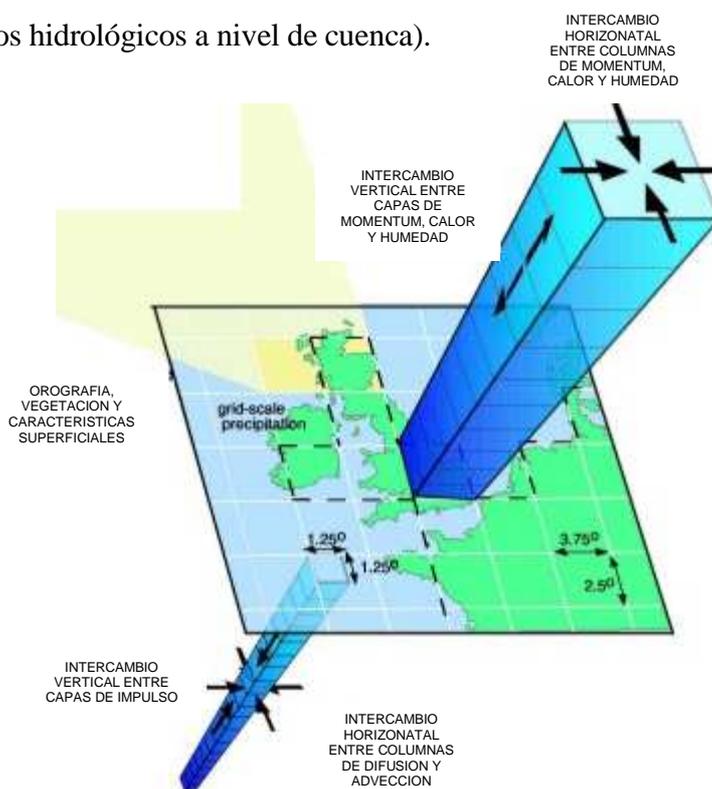


Figura 11: Esquema de los de los Modelos Climáticos de Circulación General (GCM)

Fuente: IPCC (2013)

Entonces los GCM muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de 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 (Amador, et al. 2008).

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).

2.3.5. REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS EN EL PERÚ

En contraste con la resolución grosera de los actuales GCMs (200 km), casi todos los impactos climáticos ocurren a escala local (100 m – 1 km) y su modelación requiere resolución de menor escala. Este ajuste de escala es particularmente importante en regiones de topografía compleja: montañas, zonas costeras, lagos, etc. Como es el caso del Perú.

La regionalización climática 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) de acuerdo al Marco conceptual del Proyecto “AMICAF”, ha usado de técnicas de regionalización o de disminución de escala “downscaling”, lo que ha permitido obtener información adaptadas a las características específicas del Perú. En este sentido, para el desarrollo de dicha técnica fue necesario una base de datos observacionales para desarrollar y validar los diferentes modelos de regionalización estadística, por lo que el SENAMHI proporcionó la información diaria de las variables climáticas: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para el conjunto de estaciones a nivel nacional (Ver Figura 12).

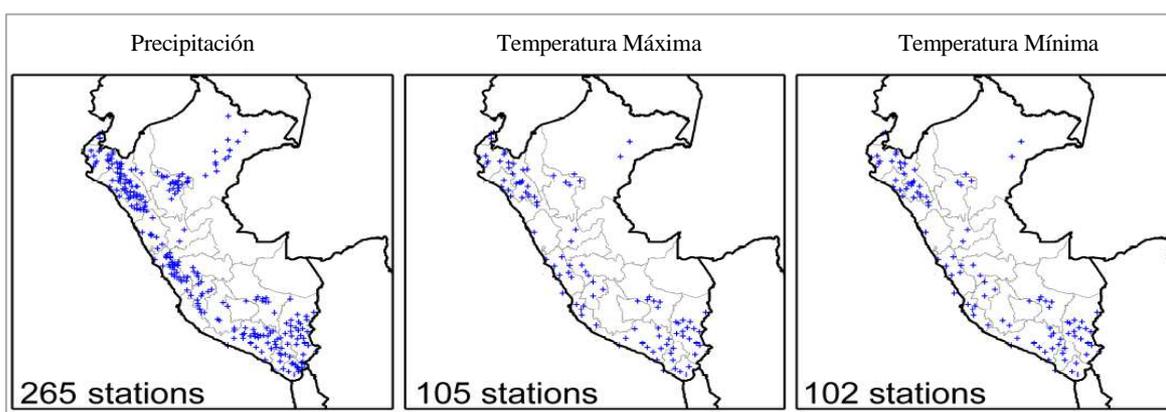


Figura 12: Puntos azules indican la ubicación de las 265, 105 y 102 estaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Fuente: SENAMHI (2015)

El SENAMHI proporcionó proyecciones de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para un conjunto de 6 posibles escenarios. En los resultados obtenidos, de acuerdo a la Figura 17, se observa que se tiene un incremento medio (respecto a 1971-2000) en todo el país entre 2°C a 3°C y 4°C a 6°C para la temperatura máxima y mínima, respectivamente. En relación a la precipitación, a pesar de su variabilidad espacial, se proyecta un incremento medio a nivel nacional de entre 10 a 20 por ciento.

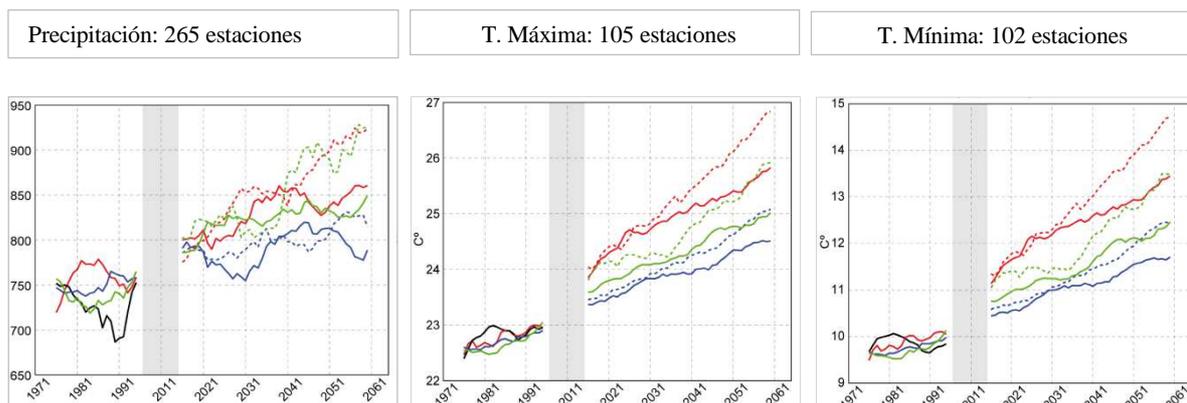


Figura 13: Proyecciones para precipitación, temperatura máxima y mínima con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000, cada escenario RCP 4.5 en línea sólida y RCP 8.5 en línea punteada.

Fuente: SENAMHI (2015)

2.3.6. FUTURO CLIMÁTICO REGIONAL PARA EL PERÚ

En el estudio del IPCC (2013) se muestran las evaluaciones regionales de cambio climático, principalmente sobre temperatura de aire superficial y precipitaciones, basado en un conjunto de múltiples modelos de proyecciones. Según el estudio, para el caso de Sur América se ve afectado por varios fenómenos climáticos. Todas las variaciones del clima que el Perú exhibe de un año a otro es conocido como variabilidad interanual, están determinadas en gran medida por la presencia de El Niño/Oscilación Sur (ENOS) y los eventos extremos asociados a éste, los que causan grandes pérdidas económicas por sus impactos. SENAMHI (2009) indica que los eventos ENOS más intensos modulan el comportamiento interanual, generando anomalías positivas de diferente intensidad a lo largo del Perú. De manera que en la Sierra Central y Sur muestran una variabilidad interanual muy similar, pero con tendencias opuestas, donde los

eventos ENOS parecen ser la principal fuente dinámica que modula, con mayor intensidad, estas regiones.

Las tendencias lineales de la temperatura máxima media anual y estacional muestran un predominio de valores positivos (aumento) sobre todo el territorio con valores de $+0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en promedio y, en general, estos son estadísticamente significativos en las zonas altas del sur del Perú. De igual modo las tendencias anuales y estacionales de las temperaturas mínimas promedio son en su mayoría positivas con valores de $0,1- 0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$, con excepción de varias estaciones ubicadas al norte del lago Titicaca. La distribución temporal de la temperatura mínima muestra su dependencia de las fases del fenómeno ENOS, que altera la variabilidad interanual, dependiendo de su intensidad. Las tendencias de las temperaturas mínimas medias se incrementaron, en promedio, ligeramente en menor proporción que las temperaturas máximas. Estas tendencias observadas se encuentran dentro del rango estimado por el IPCC4 para todo la Tierra, entre los años de 1981 a 2005 ($0,18^{\circ}\text{C}/\text{década}$). Asimismo también se analiza que estas tendencias de las temperaturas presentan valores regionales muy particulares que, posiblemente, además de la influencia antropogénica, existan otros aspectos tales como las islas de calor, crecimiento de las ciudades, alteraciones de las propiedades del suelo, deforestación, etc. En el caso de la precipitación total anual para el Perú se presenta incrementos (tendencias positivas) en el período de 1965 al 2006, marcados sobre la costa norte, con valores entre 30 y 40 por ciento sobre sus promedios, mientras que la selva norte presenta disminuciones (tendencias negativas) desde la década de 1960 hasta fines del siglo pasado, con valores entre 20 y 30 por ciento sobre sus promedios con significancia estadística (SENAMHI, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

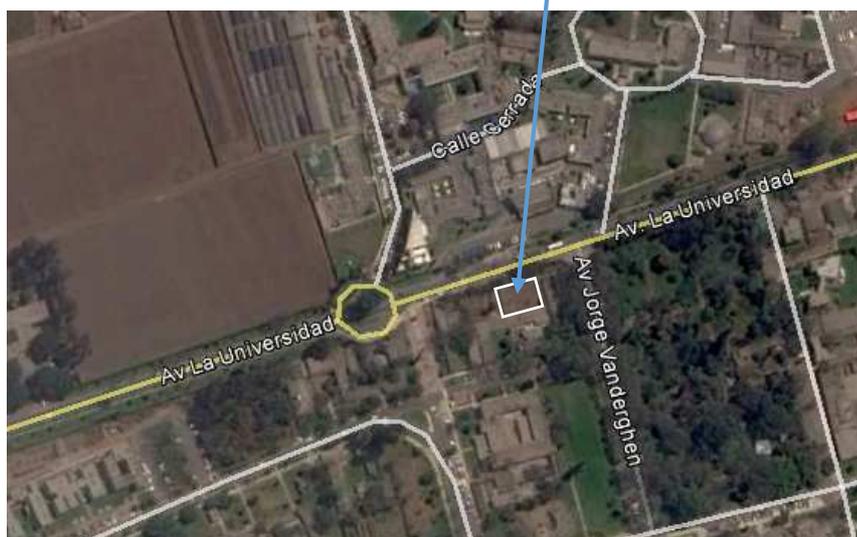
3.1. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el Área Demostrativa y Área Experimental de Riegos (ADyAER) de la facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) en el distrito de La Molina, provincia de Lima y departamento de Lima. Con coordenadas latitud sur $12^{\circ} 4'41.77''S$, longitud oeste $76^{\circ}56'45.20''O$ y altitud 246m, de la zona geográfica 18L.



La Molina, Lima

ÁREA DEMOSTRATIVA Y ÁREA
EXPERIMENTAL DE RIEGOS
(ADyAER)



Universidad Nacional Agraria La Molina

Figura 14: Área Demostrativa y Área Experimental de Riegos (ADyAER)

3.1.1. CLIMA

La información diaria climatológica fue brindada por la estación meteorológica Von Humboldt (12° 00' 05'' latitud sur, 76° 57' 00'' longitud oeste, a una altitud de 243.7 m). De acuerdo al registro de temperaturas se tuvo una máxima de 27.1°C en el mes de noviembre y una mínima de 11.1 °C en el mes de noviembre. En cuanto a la velocidad del viento, esta se mantuvo con un promedio de 1.1 m/s. Se registró una humedad relativa máxima de 100 % en el mes de setiembre y una mínima de 56 %, en el mes de diciembre. La evapotranspiración de referencia se calculó con el método de la FAO – Penman Monteith (Allen, et al. 2006), registrándose una máxima de 3.68 mm/d en el mes de diciembre.

3.1.2. AGUA

El agua para riego empleada en el estudio se obtuvo del canal de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Se realizó el análisis de la calidad del agua en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía, obteniéndose una conductividad eléctrica de 0.57 dS/m, pH o grado de acidez del agua es 7.08 (clasificado como normal según los estándares de calidad ambiental ECA que establece que el pH normal para uso en riego es de 6,5 a 8,4). En conclusión el agua del canal de riego de la UNALM corresponde al tipo C2-S1, lo cual indica que el agua es apta para cualquier tipo de suelo y cultivo (Anexo 3).

3.1.3. SUELO

Para la caracterización física del área de estudio, se realizaron muestreos de suelo con su posterior análisis en el laboratorio de Riegos de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

El campo experimental estuvo constituido por una superficie total de 180 m² la cual fue dividida en 12 parcelas cada una de 15 m², cada parcela tuvo una longitud de surco de cinco metros con dieciséis plantas por surco, un espaciamiento entre surcos de un metro y un espaciamiento entre plantas de treinta centímetros. Su estructura puede ser apreciada en la Figura 19.

Las características de la parcela experimental empleada en la presente investigación, se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: **Características de la parcela experimental**

Parcela Experimental	Numero
Área total (m ²)	180
Numero de parcelas	12
Área parcela (m ²)	15
Numero de surcos por parcela	3
Longitud de surco (m)	5
Espaciamiento entre surcos (m)	1
Distancia entre plantas (m)	0.3
Número de plantas por surco	16

3.2. MATERIALES

3.2.1. MATERIAL GENÉTICO

El cultivo de papa por ser del tipo C3 (baja tasa de evapotranspiración) requiere bajos volúmenes de agua para obtener rendimientos superiores en biomasa, Incluso mediante la aplicación de un riego deficitario.

Respecto a la variedad UNICA y MARIA REICHE: son nuevas variedades caracterizadas por ser precoces, tolerantes al calor y con aptitud a fritura. En las “siembras atrasadas” de la costa (siembra octubre) o “muy atrasadas” (enero y febrero) se desarrollan y producen significativamente mejor que las variedades tradicionales. Por su tolerancia al calor y precocidad, en la costa son apropiadas para incorporarse a los sistemas de rotación que no permite la siembra de variedades tradicionales que requieren periodos fríos para la tuberización. Para la producción comercial en la sierra se recomienda su siembra en la “campana chica”. En la “campana grande” de sierra es preferible orientar su cultivo para la producción y mantenimiento de semilla (Egusquiza, 2000).

La variedad Única: es una planta de porte mediano, follaje verde oscuro con tallos pigmentados, escasa floración, flores de color violáceos algo pálidas. Produce tubérculos de tamaño uniforme, de forma oblonga o alargada: color rojo claro, ojos superficiales; pulpa blanca marfil, brotes rojo violáceos (Egusquiza, 2000).

Las características del inicio del periodo vegetativo de la papa se detallan en la Figura 15:

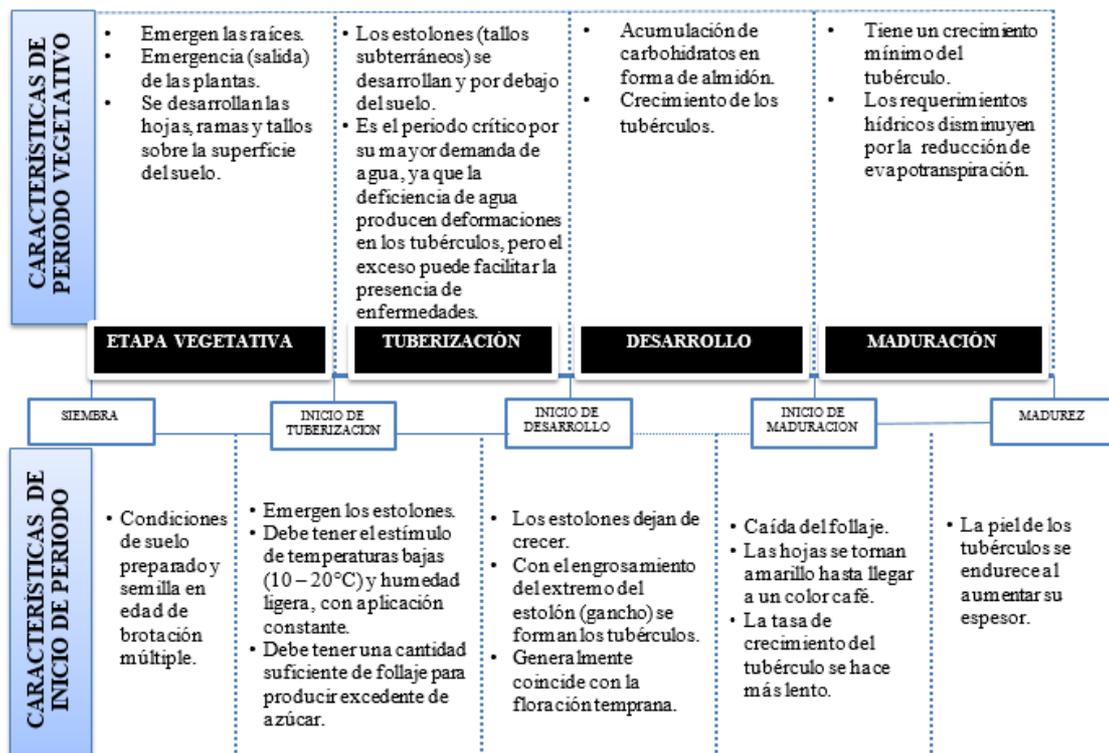


Figura 15: Características del periodo vegetativo de la papa

Fuente: Adaptado de Egusquiza (2000)

3.2.2. SOFTWARES

Los softwares usados en el presente estudio, con las respectivas funciones que cumplieron dentro del desarrollo de la presente investigación, se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Softwares utilizados en la investigación

Softwares	Descripción
	Usado para simular el rendimiento del cultivo en el periodo de la campaña de estudio, para después simular el rendimiento con información climática futura.
	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.
	Usado para generar imágenes interpoladas con datos meteorológicos futuros de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, a partir de estaciones meteorológicas cercanas a la estación Von Humboldt, para luego extraer la información necesaria ubicada en la coordenada de la estación Von Humboldt.
	Usado para ubicar geográficamente las estaciones meteorológicas que cuenten con proyecciones climáticas y que se encuentren cercanas a la estación Von Humboldt.
	Usado para determinar el área de cobertura del dosel a lo largo del periodo vegetativo.
	Usado para realizar cálculos y elaborar tablas.
	Usado para redactar la Tesis.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología seguida en la presente investigación comprende de los siguientes procedimientos:

- Caracterizar el clima, suelo, riego y cultivo en la zona de estudio requerida por el modelo agrometeorológico AquaCROP
- Calibrar y validar los parámetros del modelo agrometeorológico AquaCROP.
- Proyectar la evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única en el periodo 2030 – 2050, para determinar los efectos del cambio climático.

En la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo del proceso a seguir para cumplir los objetivos planteados en la presente investigación, la caracterización de la información requerida por el modelo se presenta dentro del cuadro amarillo, la calibración y validación dentro del cuadro celeste y la proyección y determinación del efecto del cambio climático dentro del cuadro verde.

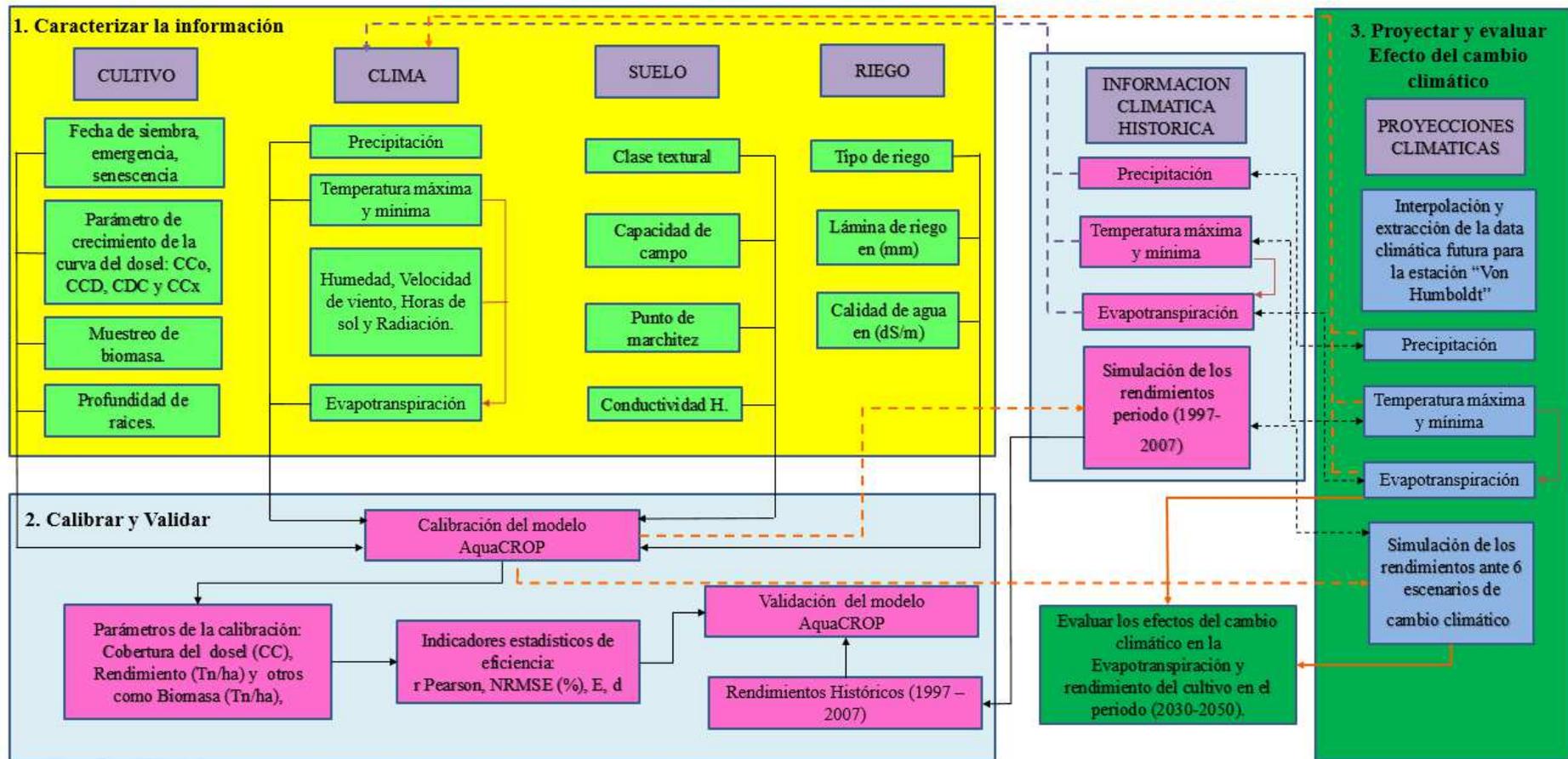


Figura 16: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio

3.3.1. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA, SUELO, RIEGO Y CULTIVO EN LA ZONA DE ESTUDIO REQUERIDA POR EL MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

a. Clima

La información climática requerida por el modelo Aquacrop para la simulación del cultivo fue la temperatura máxima y mínima del aire (°C), precipitación (mm) y evapotranspiración de referencia (mm.dia⁻¹).

a.1. Periodo de calibración (Agosto 2013 – Diciembre 2013)

Para el periodo de calibración se obtuvieron registros meteorológicos diarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol y precipitación proporcionados por la estación meteorológica Von Humboldt. Para la estimación de la evapotranspiración se usó la ecuación Penman – Monteith.

a.2. Periodo histórico (Enero 1997 – Diciembre 2007) y periodo futuro (Enero 2030 – Diciembre 2050)

Para el periodo histórico se obtuvieron registros meteorológicos históricos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación proporcionados por la estación meteorológica Von Humboldt. Para el periodo proyectado se obtuvieron proyecciones climáticas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para un conjunto de 6 posibles escenarios de cambio climático (Generados a partir de 3 Modelos de circulación general y 2 Trayectorias de concentración de CO₂) proporcionadas por el SENAMHI. Debido a que solo contamos con datos proyectados de temperatura máxima y mínima para calcular la evapotranspiración en ambos periodos se usó el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985). Los métodos basados en la temperatura del aire al ser empíricos, requieren cuidadosas calibraciones locales para alcanzar resultados satisfactorios. Una excepción posible es el método de Hargreaves que ha producido resultados razonables de ETo con cierta validez global, antes de aplicar la ecuación de Hargreaves en cada región, se debe verificar la validez de sus resultados comparándolos con estimaciones de la ecuación de FAO Penman – Monteith en estaciones meteorológicas donde se dispone de datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad de viento, cabe resaltar que si no se realiza el ajuste regional de la ecuación de Hargreaves, esta tiende a sobreestimar la evapotranspiración en condiciones de humedad relativa elevada como es el caso del distrito de La Molina (Allen, et al. 2006). Para la presente investigación se realizó el ajuste de la evapotranspiración estimada con la ecuación Hargreaves en función de la evapotranspiración estimada por Penman – Monteith.

b. Cultivo

b.1. Fases del cultivo

La siembra se realizó el 31 de agosto de 2013, a partir de ello se diferenciaron las etapas del cultivo de papa variedad Única tales como emergencia, inicio de la tuberización, inicio del desarrollo, floración, formación del fruto, máxima cobertura de dosel, inicio de la senescencia, senescencia y maduración. La duración del cultivo fue de 106 días cosechándose el 14 de diciembre de 2013.

Para determinar los requerimientos hídricos del cultivo, se determinaron las variaciones del coeficiente basal del cultivo, coeficiente de evaporación y coeficiente dual del cultivo, a lo largo del periodo vegetativo.

b.2. Evaluación de la cobertura del Dosel

AquaCrop necesita información del desarrollo de la cobertura dosel (CC) en la mayor medida posible; dado la complejidad de la medición de CC, estas fueron tomadas semanalmente. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se identificaron tres plantas en el centro de cada una de las 12 parcelas experimentales, y se procedió a medir la cobertura del dosel (CC) durante todo el ciclo vegetativo.
- Se procedió a elaborar un marco de madera enmallado de 50 cm x 50 cm, el enmallado fue diseñado con cuadrículas de 1cm x 1cm. Se colocó el marco horizontalmente sobre cada planta seleccionada, una vez colocado el marco se procedió a tomar una fotografía para guardarla en el registro. El periodo de toma de fotos se realizó cada semana desde la emergencia del cultivo (Figura 17).
- Obtenida la foto, con el uso del software AutoCAD se procedió a escalar y delimitar el perímetro de la planta dentro del marco de madera.
- La determinación de la cobertura del dosel estuvo basada por la relación entre el Área cubierta por las hojas y el área total de referencia (Donde el área total de referencia fue el distanciamiento entre planta y planta (30 cm) y entre surco y surco (100 cm)).
- Con los datos de Cobertura de dosel de todo el periodo vegetativo se graficó la curva de desarrollo del dosel CC, determinándose los valores de CC_0 , CCD , CD_x y CDD .

- Finalmente la curva del dosel obtenida con los muestreos de campo será comparada con la curva del dosel simulada por el modelo agrometeorológico AquaCROP, en el proceso de calibración y validación.

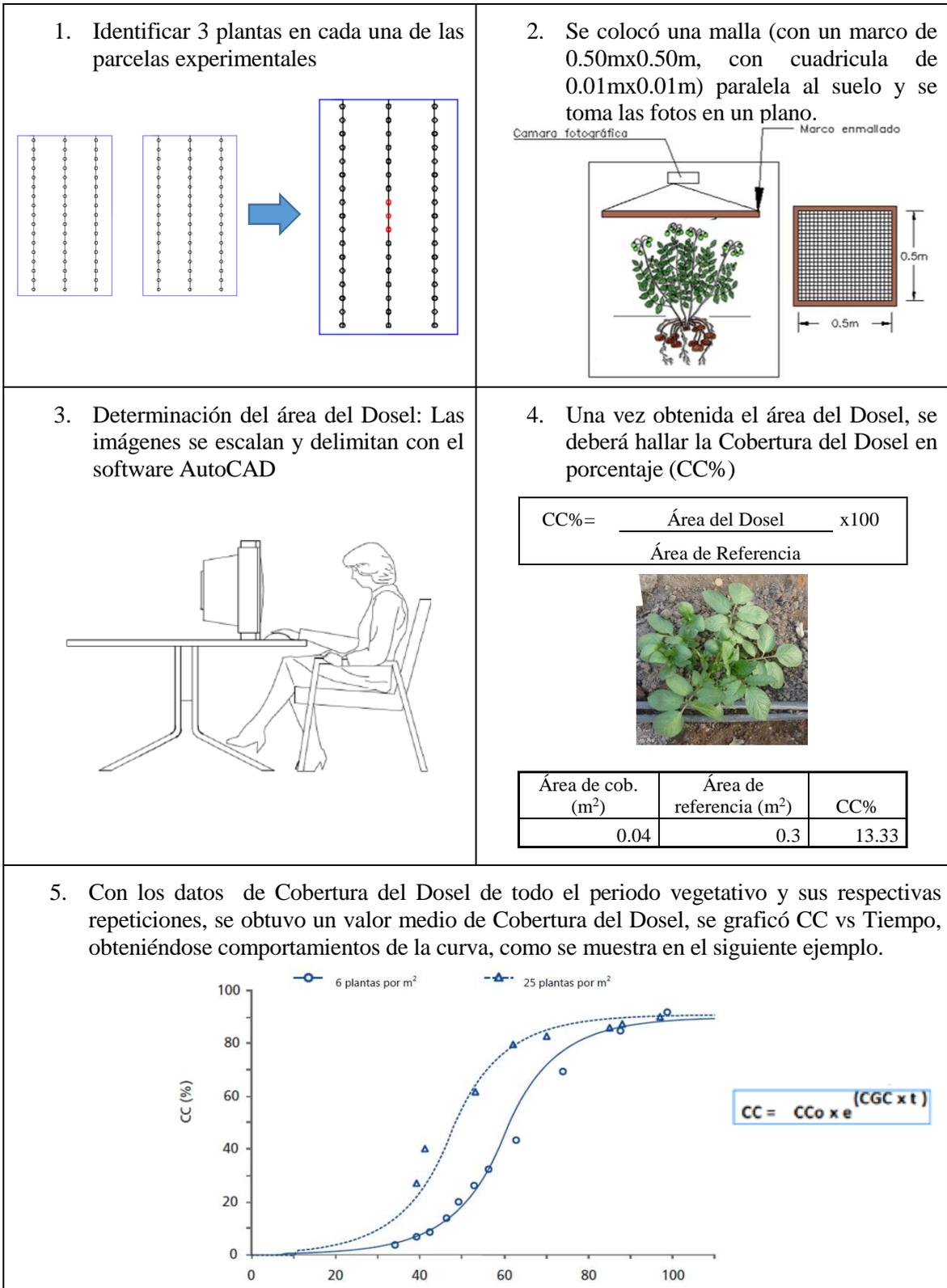


Figura 17: Medición de la cobertura de dosel.

b.3. Evaluación de la biomasa y profundidad de raíces

Para obtener la información de Biomasa seca por encima del nivel del suelo, se realizaron tres muestreos con seis repeticiones cada una, el primer muestreo se realizó a los 46 días después de la siembra (DDS), el segundo a los 78 (DDS) y el tercero se realizó el día de la cosecha es decir a los 106 (DDS). El procedimiento consistió en la extracción de la planta para luego ser pesada obteniéndose así el peso de la materia húmeda, después fue secada en un horno a 105 °C por 48 horas, terminado el proceso de secado se volvió a pesar para así obtener el peso de la materia seca. Para calibrar Aquacrop se necesita el desarrollo de la biomasa aérea seca a lo largo del periodo vegetativo.

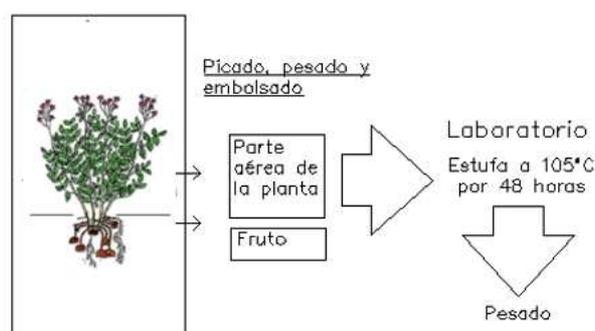


Figura 18: Procedimiento para la obtención de la biomasa seca

Para la medida de las profundidades de raíces se realizaron 8 muestreos con 4 repeticiones cada una, el primer muestreo se realizó a los 25 DDS, el segundo a los 32 DDS, el tercero a los 40 DDS, el cuarto a los 43 DDS, el quinto a los 46 DDS, el sexto a los 60 DDS, el séptimo a los 68 DDS y el octavo a los 78 DDS. El procedimiento consistió en la extracción de la planta, luego se limpió y se estiró la raíz más larga para ser medida con una wincha.

b.4. Evaluación del rendimiento

Para evaluar el rendimiento se procedió a cosechar los tres surcos de cada parcela y a determinar el peso de las papas extraídas de cada planta en gramos, seguidamente se procedió a obtener los datos biométricos de cada planta. Estos datos son detallados a continuación:

Número de papas cosechadas: Se contó el número de papas de las plantas extraídas de cada parcela experimental.

Peso de las papas en campo: Se registró el peso en gramos de las papas extraídas de cada parcela experimental.

Secado de las papas en laboratorio: Se procedió al secado en horno de una muestra de papas, pasado 48 horas se obtuvo la materia seca del tubérculo, seguido se procedió a pesar la materia seca obteniéndose el peso en gramos.

Determinación del porcentaje de humedad de la papa: Obtenido el peso húmedo y peso seco, se procedió a determinar la humedad promedio de la papa por cada parcela.

Determinación del rendimiento en campo: Se procedió a sumar los pesos de papa obtenidos de los tres surcos de cada parcela, obteniéndose un peso total de papa en gramos por parcela, el área de influencia de cada parcela fue de 15m^2 (Debido a que la longitud de surco fue de 5m y el espaciamiento entre surcos fue de 1m), después se transformó el rendimiento de gramos por cada 15 metros cuadrados a toneladas por hectárea.

Determinación del rendimiento requerido por Aquacrop: Para calibrar el modelo AquaCROP, es necesario tener como dato el rendimiento seco del cultivo, es por eso que una vez obtenido el rendimiento en campo se procedió a descontar el porcentaje de humedad obteniéndose así el rendimiento en toneladas por hectárea de materia seca.

c. Suelo

Para modelar un cultivo en AquaCROP, son necesario datos característicos del suelo como textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, saturación y conductividad hidráulica.

Para realizar la caracterización física del suelo se realizaron muestreos, los cuales fueron analizados en el laboratorio de riegos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

d. Riego

Para modelar un cultivo en AquaCROP, son necesario datos característicos del riego como tipo de riego, número de eventos de riego y lámina aplicada por evento los cuales fueron obtenidos a lo largo del periodo vegetativo del cultivo. También es necesario conocer la conductividad eléctrica del agua, para esto se realizó un análisis del agua para riego en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía. El sistema de riego usado en la investigación fue por goteo el cual tuvo las siguientes características: Separación entre goteros 0.3m, separación entre laterales 1m, caudal de gotero 2.3 l/h, 1 lateral por surco y 16 goteros por surco (Figura 19).

Con respecto al riego, este fue aplicado inter diario desde la siembra hasta unos días antes de la cosecha para asegurar un suministro adecuado del recurso, el tiempo promedio de aplicación fue de tres horas. Se emplearon dos láminas de riego por lo que seis parcelas fueron regadas con una lámina normal (T_0) y las seis restantes con una lámina reducida (T_1).

Lámina normal: Fue un riego normal el cual repuso el 100% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), durante todo el ciclo vegetativo.

Lámina reducida: Fue un riego deficitario debido a que repuso el 100% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) hasta mediados del ciclo vegetativo, para después reponer solo el 50% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

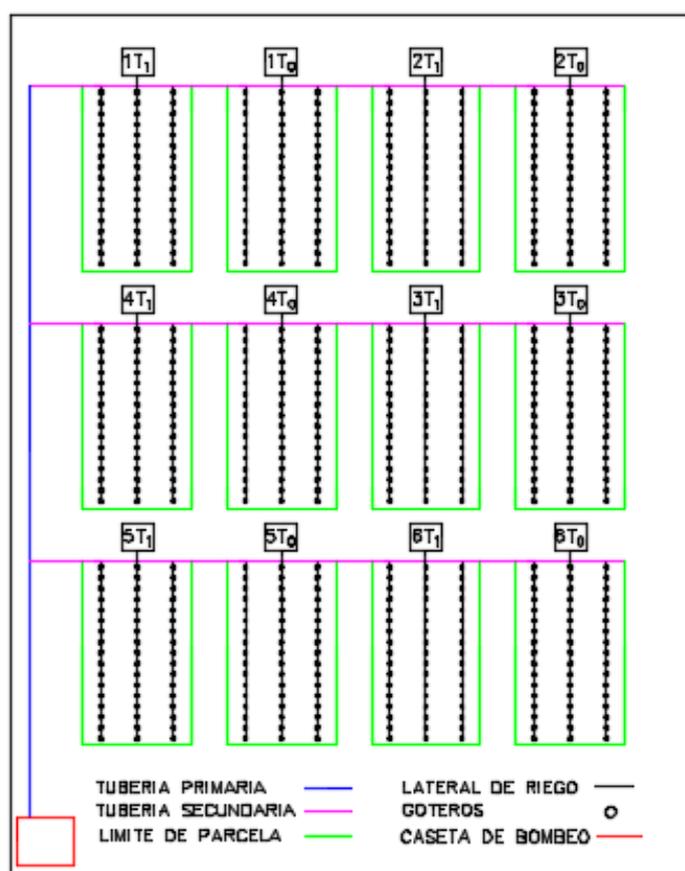


Figura 19: Diseño experimental de la investigación

El experimento se llevó a cabo entre los meses de agosto a diciembre del 2013, en la Universidad Nacional Agraria La Molina, empleando riego por goteo, con la finalidad de evaluar el rendimiento del cultivo de papa, variedad Única, bajo condiciones de riego deficitario.

3.3.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

En primer lugar se abordó la conformación de los archivos de entrada al modelo de cada uno de los bloques o módulos que este maneja. En estos archivos se establecieron las variables de clima, cultivo, suelo y riego.

La calibración consistió en simular el desarrollo de la cobertura del dosel usando las observaciones de campo obtenidas de las parcelas regadas con lámina normal (T_0), seguido se ajustaron manualmente los parámetros de calibración del modelo agrometeorológico AquaCROP, para que la curva de desarrollo del dosel simulada se ajuste a la curva generada por las observaciones de campo, la eficiencia de la modelación se midió en función de indicadores estadísticos de eficiencia. Para evaluar la significancia y los intervalos de confianza de las relaciones de dependencia entre los datos medidos en campo y los simulados por el modelo agrometeorológico AquaCROP, se empleó un nivel de significancia (α) del 5% en la prueba estadística t-Student que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Tc = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (13)$$

Dónde: Tc es el estadístico t-Student, H_0 plantea si hay relación entre los datos observados y simulados, la cual es rechazada si $|Tc| > T_{1-\alpha/2}$, donde $T_{1-\alpha/2}$ es un punto de la distribución t-Student con n-2 grados de libertad y probabilidad de excedencia de $\alpha/2$.

El rendimiento y biomasa simulados por el modelo también fueron comparados con las observaciones de campo el día de la cosecha.

Los parámetros de calibración del modelo fueron los siguientes:

- Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)
- 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 usados para el proceso de calibración y validación fueron los siguientes:

- **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, et al. 1992).

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (14)$$

Dónde: r, coeficiente de correlación de Pearson; σ_{xy} , covarianza de “x, y”, σ_x σ_y , desviación estándar de “x” e “y”.

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

Para calcular la magnitud del desvío entre los valores simulados con los observados, 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 et al., 2012).

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{med}} * 100 \quad (15)$$

Dónde: NRMSE, error medio cuadrático normalizado [%]; O_{med} , media de los datos observados; RMSE, error medio cuadrático [unidades de la variable analizada].

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (16)$$

Dónde: P_i , valores simulados o predecidos; 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 & Sutcliffe (1970), eficiencia del modelo (E, no dimensional). Del cual, Moriasi, et al. (2007) hace mención que este es un estadístico normalizado que determina cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \right] \quad (17)$$

Dónde: E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; P_i, Valores simulados o predecidos; 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 4 según Molnar (2011).

Tabla 4: **Calificación de la eficiencia de la 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”

$$E_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(P_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(O))^2} \quad (18)$$

Dónde: sus componentes, (P_i, O_i, O), son los mismos que los de la Ecuación 17.

- **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, 1984).

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

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (19)$$

Dónde: sus componentes, (Pi, Oi, O), son los mismos que los de la Ecuación 17.

La validación consistió en simular el desarrollo de la cobertura del dosel, con el modelo AquaCROP ya calibrado, usando las observaciones de campo obtenidas de las parcelas regadas con lámina reducida (T₁), para la posterior comparación entre la curva del dosel simulada y la curva del dosel observada, la eficiencia de la modelación se midió en función a los indicadores estadísticos de eficiencia mencionados previamente. Para evaluar la significancia y los intervalos de confianza de las relaciones de dependencia entre los datos de cobertura de dosel medidos en campo y los simulados por el modelo agrometeorológico AquaCROP, se empleó la prueba estadística t-Student para un nivel de significancia (α) del 5%. El rendimiento y biomasa simulados por el modelo también fueron comparados con las observaciones de campo obtenidas de las parcelas regadas con lámina reducida el día de la cosecha.

Seguido, se realizó la validación temporal del modelo agrometeorológico AquaCROP, para lo cual se simularon rendimientos con información climática histórica, estos rendimientos simulados fueron comparados con los rendimientos históricos obtenidos del Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Centro Internacional de la papa (CIP) y algunas tesis de la Biblioteca Agrícola Nacional. Para evaluar la significancia y los intervalos de confianza de las relaciones de dependencia entre los rendimientos históricos y los rendimientos simulados por el modelo agrometeorológico AquaCROP, se empleó la prueba estadística t-Student para un nivel de significancia (α) del 5%.

3.3.3. PROYECCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO DE LA PAPA VARIEDAD ÚNICA EN EL PERIODO 2030 – 2050 PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Después de calibrar y validar el modelo y obtenidos los indicadores estadísticos de eficiencia más favorables en el periodo de estudio (agosto 2013 – diciembre 2013), se procedió a proyectar la evapotranspiración y rendimiento de la papa variedad Única con las proyecciones climáticas (Información brindada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para un conjunto de seis posibles escenarios (3 GCM X 2 RCPs), en el periodo 2030 - 2050, finalmente se evaluó el efecto del cambio climático en dichas proyecciones.

En la Tabla 5, se presentan los seis escenarios de cambio climático con sus respectivas características, los cuales fueron generados a partir de tres Modelos de circulación general (CanESM, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos Trayectorias de concentración de CO₂ (RCP4.5 y RCP8.5) del CMIP5.

Tabla 5: **Características de los seis escenario de cambio climático**

Escenario de cambio climático	Descripción
CanESM2 (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 2.8° x 2.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO ₂] de 538 ppm al año 2100
CNRM-CM5 (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.4° x 1.4° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO ₂] de 538 ppm al año 2100
MPI-ESM-MR (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.8° x 1.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO ₂] de 538 ppm al año 2100
CanESM2 (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 2.8° x 2.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO ₂] de 936 ppm al año 2100
MPI-ESM-MR (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.8° x 1.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO ₂] de 936 ppm al año 2100
CNRM-CM5 (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.4° x 1.4° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO ₂] de 936 ppm al año 2100

Fuente: SENAMHI (2015)

SENAMHI 2013, proporcionó proyecciones climáticas para 265 estaciones de precipitación, 105 estaciones de temperatura máxima y 102 estaciones de temperatura mínima. Debido a que la investigación se llevó a cabo bajo condiciones de La Molina, sería necesario obtener proyecciones climáticas de estaciones cercanas al área de estudio, puntualmente en las coordenadas de la estación meteorológica Von Humboldt la cual representa las condiciones de La Molina. Por lo explicado anteriormente fue necesario contar con un método que nos ayude a obtener las proyecciones climáticas (Enero 2030 – Diciembre 2050) para las condiciones de La Molina.

Procedimiento para la obtención de la información climática futura (Enero 2030 – Diciembre 2050) para condiciones de La Molina:

- Seleccionar estaciones cercanas al área de influencia de la zona de estudio, con el software ArcGIS se procedió a cargar el Shapefile de la región Lima y a ubicar geográficamente las estaciones más cercanas a la zona de estudio, determinándose un conjunto de cuatro estaciones para precipitación y cuatro estaciones para temperatura máxima y temperatura mínima, las cuales son presentadas en el Anexo 5.
- Obtener la información climática futura del 2030 al 2050 de las estaciones seleccionadas, la información fue descargada de la base de datos del SENAMHI, la cual consistió en información climática decadiaria de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para un conjunto de seis escenarios de cambio climático de enero de 2030 a diciembre de 2050.
- Usar un método de interpolación que permita generar información con las estaciones seleccionadas y un método de extracción de la información interpolada. Se usó el lenguaje de programación R, con el cual se generó un código de interpolación mediante el método de la distancia inversa (IDW) y un código de extracción en las coordenadas de la estación meteorológica Von Humboldt.
- Con la información climática futura decadal (2030 – 2050) se generaron 756 imágenes raster para precipitación, 756 imágenes raster para temperatura máxima y 756 imágenes raster para temperatura mínima. Obtenidas las imágenes raster, se procedió a usar el código de extracción, obteniéndose así la información climática futura en las coordenadas de la estación meteorológica Von Humboldt la cual representa las condiciones climáticas de La Molina.

a. Efecto del cambio climático en las proyecciones climáticas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima

Obtenida las proyecciones climáticas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para el periodo de enero de 2030 a diciembre de 2050, se procedió a determinar el efecto del cambio climático en la precipitación y temperatura comparando las proyecciones climáticas (2030 – 2050) con la información climática histórica (1997 – 2007). El análisis se llevó a cabo en función del coeficiente de variación porcentual de la información climática histórica y la variación porcentual de las proyecciones climáticas con respecto a la histórica. La comparación entre el coeficiente de variación y la variación porcentual determinó si el cambio era no significativo, significativo o muy significativo.

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

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

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

Dónde: CV: Es el coeficiente de variación porcentual de la información climática histórica y X: Es la variación porcentual entre la información climática histórica y las proyecciones climáticas.

b. Efecto del cambio climático en las proyecciones de la evapotranspiración y rendimiento del cultivo

Con las proyecciones climáticas de temperatura máxima y mínima, se proyectó la evapotranspiración para el periodo de enero de 2030 a diciembre de 2050 y con la información climática histórica del periodo de enero de 1997 a diciembre de 2007 se estimó la evapotranspiración histórica. Se procedió a determinar el efecto del cambio climático en la evapotranspiración comparando la ETo proyectada (2030 – 2050) con la ETo histórica (1997 – 2007). El análisis se llevó a cabo en función del coeficiente de variación porcentual de la evapotranspiración histórica y la variación porcentual de la evapotranspiración futura con respecto a la histórica.

La comparación entre el coeficiente de variación y la variación porcentual determinó si el cambio era no significativo, significativo o muy significativo.

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

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

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

Dónde: CV: Es el coeficiente de variación porcentual de la evapotranspiración histórica y X: Es la variación porcentual entre la evapotranspiración histórica y la evapotranspiración proyectada.

c. Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo

Se procedió a generar el archivo climático requerido por el modelo agrometeorológico AquaCROP para el periodo (2030 – 2050), seguido se procedió a simular el rendimiento del cultivo de papa variedad Única. Obtenidos los rendimientos para los seis escenarios de cambio climático, se determinó el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de papa variedad Única. El análisis se llevó a cabo en función del coeficiente de variación porcentual de los rendimientos simulados históricos (1997 – 2007) y la variación porcentual de los rendimientos proyectados (2030 – 2050) con respecto a los simulados históricos.

La comparación entre el coeficiente de variación y la variación porcentual determinó si el cambio era no significativo, significativo o muy significativo.

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

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

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

Dónde: 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).

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

Dónde: σ : Es la desviación estándar y X: Es el promedio de los datos

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA, SUELO, RIEGO Y CULTIVO

4.1.1. CLIMA

a. Periodo de calibración (2013)

La información climática de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, radiación y velocidad de viento fueron obtenidas de la estación meteorológica Von Humboldt. La evapotranspiración se estimó con la ecuación de Penman – Monteith. En la Figura 20 se observan las características climáticas del periodo de calibración (31 de Agosto del 2013 al 14 de Diciembre de 2013).

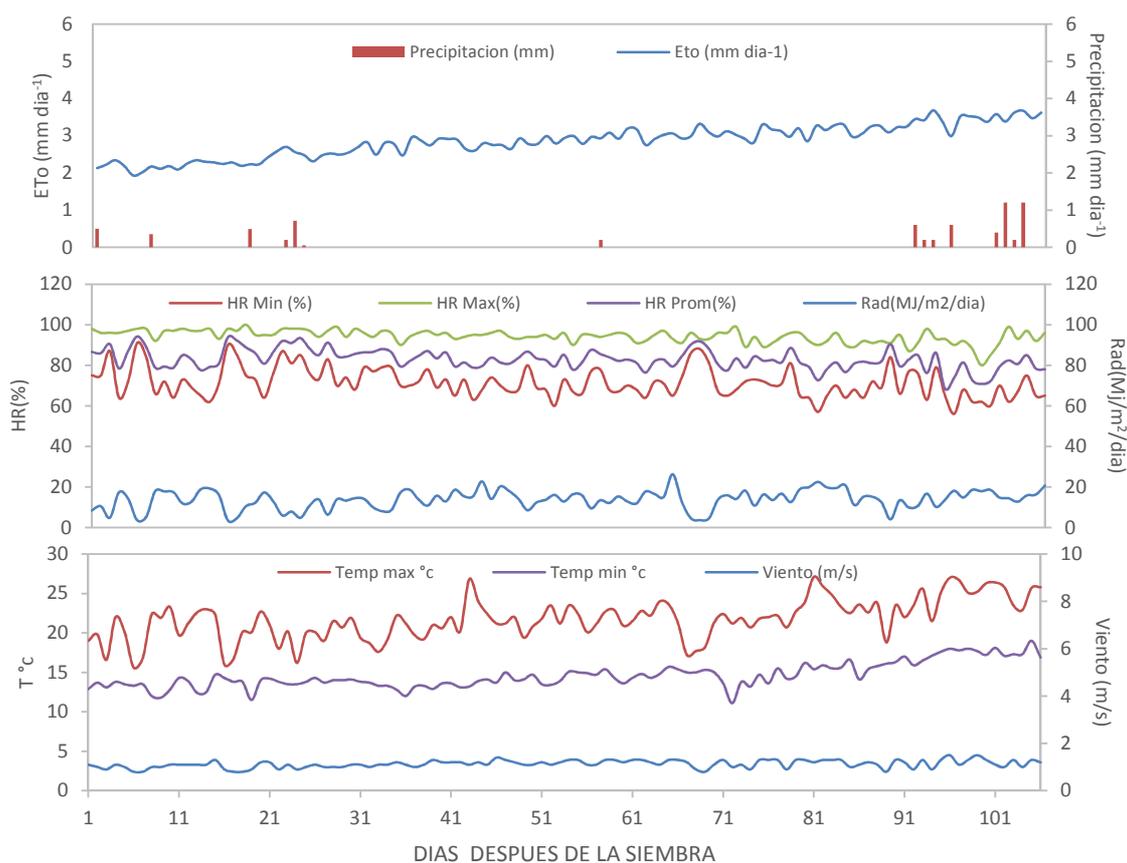


Figura 20: Variabilidad diaria de la Precipitación, T max, T min, Humedad Relativa, Velocidad de viento, Radiación y Evapotranspiración para el periodo de desarrollo del estudio: 31 de agosto al 14 de diciembre de 2013

Fuente: Elaborado con información de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt

b. Periodo histórico (1997 – 2007) y periodo futuro (2030 – 2050)

La información climática histórica se obtuvo de la estación meteorológica Von Humboldt la cual consistió en información climática diaria de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de enero de 1997 a diciembre de 2007, la cual se muestra detalladamente en los Anexos seis, siete y ocho. La información climática futura se obtuvo de las proyecciones del SENAMHI la cual consistió en información climática decadiaria de enero del 2030 a diciembre del 2050 y su proceso de obtención para condiciones de La Molina fue explicado previamente.

Debido a que para estos periodos solo contamos con información de temperatura máxima y mínima, la evapotranspiración se estimó con la ecuación de Hargreaves, dicha ecuación tuvo que ser ajustada debido a que tiende a sobreestimar la evapotranspiración en condiciones de humedad relativa elevada (Allen, et al. 2006) como es el caso de La Molina. El ajuste se realizó en función de la evapotranspiración estimada con la ecuación Penman – Monteith

El ajuste consistió en modificar el coeficiente empírico C de la ecuación Hargreaves para que los valores estimados por la ecuación Hargreaves obtengan el menor índice de error con respecto a los valores de evapotranspiración estimados por la ecuación Penman Monteith obteniéndose lo siguiente:

$$ET_o = C(t_{med} + 17.78)R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Dónde: C: Coeficiente empírico de la ecuación Hargreaves, Ro: Radiación solar extraterrestre, Tmax: Temperatura máxima y Tmin: Temperatura mínima

Coeficiente empírico de la ecuación Hargreaves ajustado para condiciones de La Molina:

Constante C = 0.0023; valor original.

Constante C = 0.00204; valor ajustado para condiciones de La Molina.

En la Tabla 6, se presentan los resultados de la correlación lineal entre los valores de evapotranspiración calculados por la ecuación Penman – Monteith y los valores de evapotranspiración obtenidos por la ecuación de Hargreaves con su coeficiente empírico ajustado para condiciones de La Molina (C = 0.00204), obteniéndose un error cuadrático medio de 0.0306 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.98.

Tabla 6: Indicadores estadísticos del ajuste de la evapotranspiración estimada con la ecuación Hargreaves en función de la evapotranspiración estimada por Penman – Monteith para condiciones de La Molina

Estación Von Humboldt					
Norte(m)	Este(m)	Altitud (m)	Ajuste		
			Error Medio	R	Constante (C)
8663637.26	288931.04	251.0	0.0306	0.98	0.00204

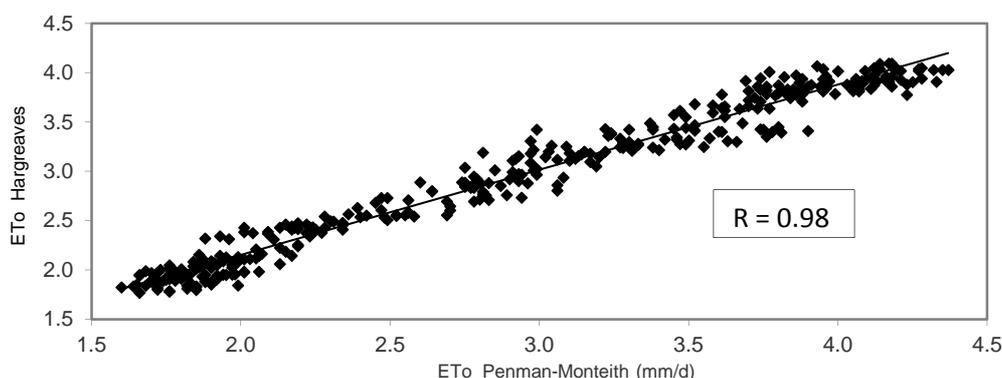


Figura 21: Correlación lineal de la evapotranspiración estimada por Hargreaves y Penman – Monteith para condiciones de La Molina. Periodo de análisis: Del 01 de enero al 31 de diciembre del 2013

Se utilizó un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores de evapotranspiración calculados por el método Penman – Monteith y los valores de evapotranspiración calculados por el método Hargreaves, obteniéndose, como muestra la Tabla 7, una correlación positiva significativa para un coeficiente de Pearson de 0.98.

Tabla 7: Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores de evapotranspiración calculados por Penman - Monteith en comparación a los calculados por Hargreaves

Prueba estadística T - Student	Evapotranspiración	
	Penman - Monteith	Hargreaves
Media muestral (X)	2.94	2.97
Varianza muestral (S2)	0.73	0.56
Observaciones	365	365
Dif. Hipotética de las medias	0	0
Grados de libertad	728	
Estadístico t	0.39	
t Tabla ($\alpha=0.05$)	1.96	
Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t$ Tabla)		

Otro modo de ajuste del coeficiente empírico de la ecuación de Hargreaves sería comparando los valores obtenidos por dicha ecuación con los valores obtenidos del tanque evaporímetro Clase A. Los tanques han probado su valor práctico y han sido utilizados con éxito para estimar ETo observando la evaporación del tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la ETo (Allen, et al. 2006).

4.1.2. CULTIVO

a. Fases del cultivo

En la Figura 22 se diferenciaron las etapas del cultivo a lo largo del periodo vegetativo cuya duración fue de 106 días empezando con la siembra el 31 de agosto de 2013 y terminando con la cosecha el 14 de diciembre de 2013.

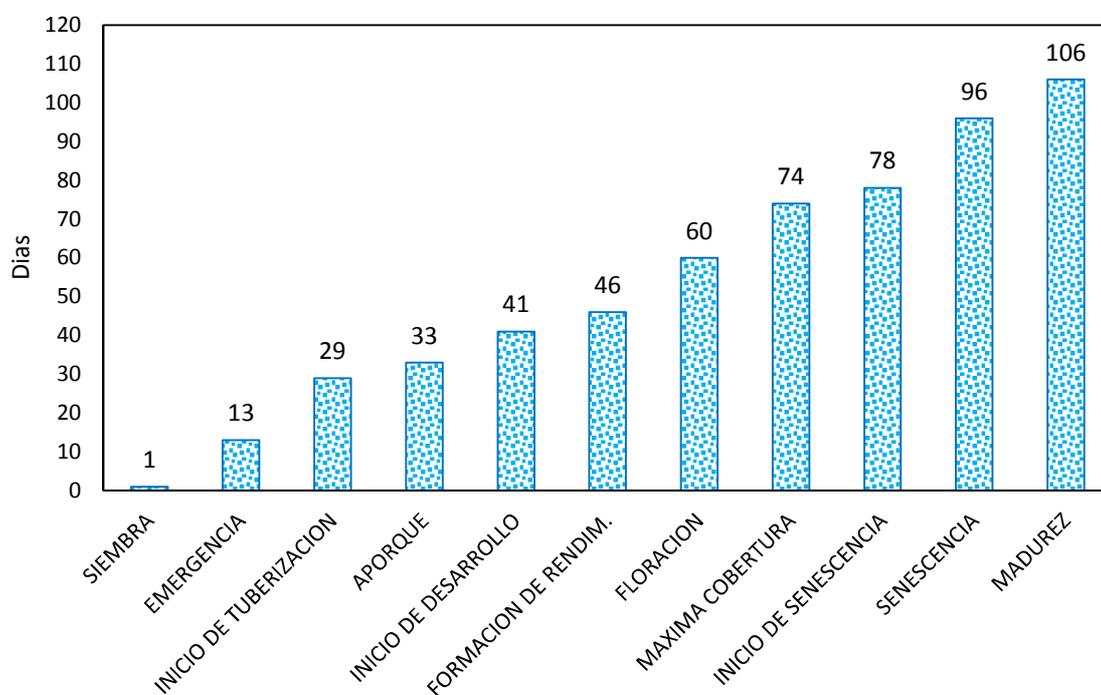


Figura 22: Etapas del cultivo a lo largo del periodo vegetativo

En la Figura 23 se muestra la variación del coeficiente dual del cultivo. Durante la etapa inicial, el K_c dual= 0.56, el $K_e=0.41$ y el $K_{cb}=0.15$, en la etapa de desarrollo el K_c dual se incrementó desde 0.56 a 1.05, el K_e disminuyó de 0.41 a 0.05 y el K_{cb} incrementó de 0.15 a 1.00, en la etapa de mediados de temporada K_c dual=1.18 (alcanzando su mayor valor), el $K_e=0.05$ y el $K_{cb}=1.13$ (alcanzando su mayor valor), y por última etapa final, el valor de K_c dual disminuyó de 1.18 a 0.95, el K_e se incrementó de 0.05 a 0.40 y el K_{cb} se redujo de 1.13 a 0.60.

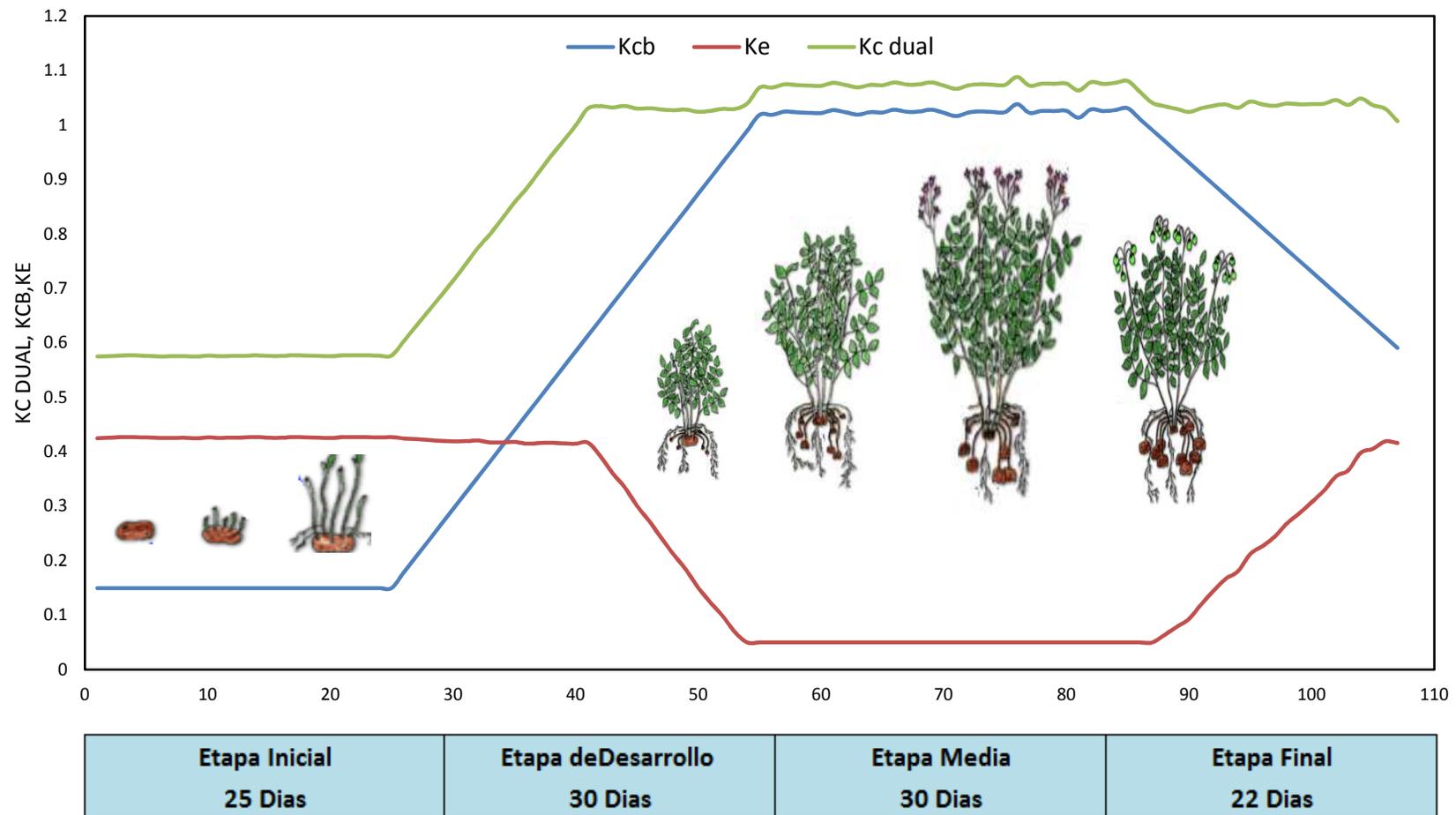


Figura 23: Variación del coeficiente del cultivo dual Kc dual línea verde, coeficiente basal del cultivo Kcb línea azul y coeficiente de evaporación línea roja, durante el desarrollo del cultivo papa variedad Única, bajo riego por goteo, en el periodo de Agosto a Diciembre del 2013

b. Evaluación de la cobertura del Dosel

En la Tabla 8 se presentan los porcentajes promedio de cobertura del dosel obtenidos de 16 fechas de muestreo con doce 12 repeticiones por fecha, observándose que el experimento con lámina normal de riego alcanzó mayores valores de cobertura del Dosel, esto debido a que el suministro de agua fue adecuado y no generó estrés hídrico en la planta.

Tabla 8: Cobertura del Dosel promedio de los 16 muestreos realizados con 12 repeticiones por muestreo

Día de medición	Cobertura del dosel (%)		
	DDS	Lamina optima	Lamina reducida
14		2.0	2.0
21		15.7	8.5
25		31.8	22.4
32		48.7	38.6
35		39.7	32.7
40		60.1	60.8
43		61.7	64.2
46		59.5	56.3
54		58.6	58.7
60		55.7	61.8
68		65.9	50.3
74		67.5	50.4
78		59.5	49.3
82		56.2	50.2
88		50.0	43.3
96		44.3	35.1

c. Evaluación de la biomasa y profundidad de raíces

En la Tabla 9 se observa que el experimento con lámina normal de riego produce más Biomasa aérea seca, comprobándose que el experimento con lámina reducida de riego sufrió estrés hídrico. De acuerdo a la profundidad de raíces, se observa que el experimento con lámina normal de riego alcanza su mayor valor a los 43 DDS, el cual es mayor a la máxima profundidad de raíces alcanzada por el experimento con lámina reducida.

Tabla 9: Profundidad de raíces con ocho muestreos y dos repeticiones por muestreo, Biomasa aérea con tres muestreos y seis repeticiones por muestreo

Día de medición	Profundidad de raíces en (cm)		Biomasa aérea seca (Tn.ha ⁻¹)		
	DDS	Lamina optima	Lamina reducida	Lámina óptima	Lámina reducida
25		12.5	15.0	-	-
32		21.5	21.0	-	-
40		38.5	34.0	-	-
43		42.5	36.0	-	-
46		38.0	40.0	3.59	3.58
60		40.5	39.5	-	-
68		37.5	41.5	-	-
78		37.3	33.6	8.68	8.22
106		-	-	12.39	11.75

4.1.3. SUELO

El suelo presento textura Franco Arenosa (suelo con moderada capacidad de retención de humedad), capacidad de campo de 26.6%, punto de marchitez permanente de 13.2% y densidad aparente de 1.5 gr.cm⁻³. Las características requeridas por el modelo agrometeorológico AquaCROP se encuentran detalladas en la Tabla 10.

Tabla 10: **Características del suelo requeridas por el modelo AquaCROP**

PROF. (cm)	TEXTURA	CAPACIDAD DE CAMPO (CC%)	PUNTO DE MARCHITEZ (PMP%)	DENSIDAD APARENTE (gr.cm ⁻³)	SATURACION (n%)	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Ks(mm.dia ⁻¹)
0 - 30	Franco arenoso	26.6	13.2	1.5	48	400
30 - 60	Franco arenoso	26.6	13.2	1.5	41	400

4.1.4. RIEGO

Del análisis al agua para riego se obtuvo una conductividad eléctrica de 0.57 dS/m. Se aplicó riego por goteo con dos láminas, una lámina normal a seis parcelas (T₀) y una lámina reducida a las seis restantes (T₁), obsérvese la distribución de las parcelas en la Figura 19.

Lámina normal (T₀): Lámina de 242 mm que fue un riego normal debido a que aseguró el 100% de los requerimientos hídricos del cultivo a lo largo del ciclo vegetativo.

Lámina reducida (T₁): Lámina de 150 mm que fue un riego deficitario debido a que aseguro el 100% de los requerimientos hídricos del cultivo hasta mediados del ciclo vegetativo para después asegurar solo el 50% de los requerimientos hídricos en el periodo no crítico de la producción.

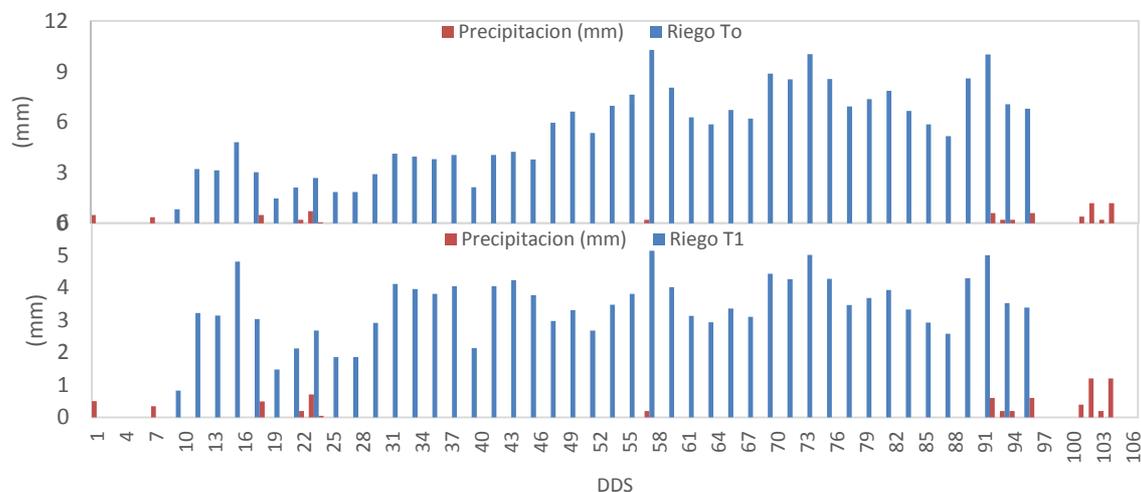


Figura 24: **Precipitación diaria y eventos de riego durante el período vegetativo del cultivo. (T₀ lámina normal, T₁ lámina reducida)**

4.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

Un adecuado ajuste de la curva del dosel (CC) asegura una buena aproximación en la estimación de la biomasa y el rendimiento del cultivo, también tiene una especial importancia tanto en el modelamiento de la transpiración del cultivo y en la evaporación del agua del suelo. Es por eso que la calibración y validación del modelo se basó fundamentalmente en los parámetros que determinan la Curva del dosel (CC), como: CC_0 , CC_x , CGC y CDC. Finalmente se realizó la comparación de la curva del dosel observada en campo y la simulada por el modelo mediante indicadores estadísticos de eficiencia, esto para el periodo fenológico del cultivo (agosto a diciembre del 2013).

Los efectos del estrés hídrico en el crecimiento del dosel, el cierre de los estomas y la senescencia acelerada del dosel son arbitrados a través de la función de respuesta al estrés (K_s) para estos procesos, con sus umbrales característicos expresados en términos de agotamiento fraccional (p) del agua potencial disponible total en la zona radicular (TAW). Tal como se describe en Steduto et al. (2009), de los tres procesos, el crecimiento del dosel es el más sensible al estrés hídrico; por consiguiente, su umbral superior (p_{upper}) no debería estar muy por debajo de la capacidad de campo del suelo de la zona radicular (muy poco agotamiento). El crecimiento del dosel se detiene completamente en el umbral inferior (p_{lower}), punto en que el contenido de agua en la zona radicular aún está considerablemente por encima del punto de marchitez permanente; es decir, el agotamiento es significativamente inferior a completo. Para el cierre estomático y la senescencia acelerada, el p_{upper} debe ser considerablemente mayor al del crecimiento foliar, y el p_{lower} se fija en 1 (agotamiento completo) en AquaCROP (Steduto, et al. 2012).

El resultado del proceso de calibración se muestra en el Anexo 1, en él se puede observar que la lámina normal de riego aplicada (T_0) mantuvo la humedad del suelo cerca a la capacidad de campo (FC) todo el ciclo vegetativo, debido a esto el cultivo no sufrió estrés hídrico. La expansión del dosel no se vio afectada debido a que el contenido de agua disponible en la zona radicular no superó su umbral superior p_{upper} (línea verde) calibrado en 0.20, no se observó cierre estomático ya que el contenido de agua en la zona radicular no supera su umbral superior p_{upper} (línea roja) calibrado en 0.75 debido a esto la transpiración del cultivo (Tr) no se vio afectada, por último no se generó senescencia temprana del dosel ya que al igual que los casos anteriores el contenido de agua en la zona radicular no superó su umbral superior p_{upper} (línea amarilla) calibrado en 0.85.

El resultado del proceso de validación se muestra en el Anexo 2, en él se puede observar que la lámina reducida de riego aplicada (T_1) mantuvo la humedad del suelo cerca a la capacidad de campo (FC) hasta alcanzar la máxima cobertura del dosel (46 DDS) para después decaer superando los umbrales de estrés hídrico, debido a esto el cultivo sufrió estrés hídrico. La expansión del dosel no se vio afectada debido a que el déficit hídrico empezó cuando el dosel ya se había desarrollado en su totalidad, se observa un cierre estomático del 14% ya que el contenido de agua en la zona radicular descendió superando su umbral superior p_{upper} (línea roja) calibrado en 0.75, debido a esto se observó que transpiración del cultivo (Tr) no fue la adecuada a partir del día 66 DDS, por último no se generó senescencia temprana del dosel ya que el contenido de agua en la zona radicular no supero su umbral superior p_{upper} (línea amarilla) calibrado en 0.85. El estrés hídrico provoco una caída en la producción de biomasa aérea seca y rendimiento seco con respecto a los obtenidos en el experimento con lámina normal de riego.

En la Tabla 11 se presentan el conjunto de parámetros por defecto que ofrece el modelo y también los parámetros ya calibrados para el presente trabajo de investigación

Tabla 11: Parámetros calibrados del Modelo AquaCrop para el cultivo de papa, variedad Única, bajo condiciones de La Molina

Descripción	Valor		Unidad
	Defecto*	Calibrado	
Cobertura del dosel del promedio de las plantas al 90% de emergencia (CCo)	0.6	0.47	%dia-1
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	18.9	19.8	%
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)	1.9	5.6	%
Cobertura máxima del dosel (CCx)	98	68	%
Índice de cosecha de referencia (Hlo)	75	90	%
Productividad del agua normalizada por ETo y CO ₂ (WP*)	18	20	g/m ²
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p_{upper})	0.20	0.20	-
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p_{lower})	0.60	0.5	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)	3	3	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p_{upper})	0.55	0.75	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)	3	3	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana(p_{upper})	0.70	0.85	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)	3	3	-
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo ($K_{cb\ med}$)	1.10	1.13	-

Fuente: *Raes, et al. (2012)

4.2.1. COBERTURA DEL DOSEL (CC)

Se usó un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student para cuantificar el grado de dependencia entre la media de las 192 muestras de cobertura del dosel registradas en 16 fechas para cada experimento y los valores simulados por el modelo, obteniéndose, como muestra la Tabla 12, grados de significación positiva en los dos experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson de 0.95 y 0.94 indicados en la Tabla 13.

Los 192 datos de cobertura del dosel 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 12: Resultados de la prueba T-Student con un nivel de significancia del 5% para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedio de la cobertura del dosel observada con la simulada.

Prueba estadística T - Student	Experimento L. Normal		Experimento L. Reducida	
	Simulado	Promedios observados	Simulado	Promedios observados
Media muestral (X)	50.60	48.56	50.60	44.77
Varianza muestral (S ²)	536.02	334.82	536.02	376.00
Observaciones	16	16	16	16
Dif. Hipotética de las medias		0		0
Grados de libertad		30		30
Estadístico t		0.27		0.77
t Tabla ($\alpha=0.05$)		2.04		2.04
		Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t$ Tabla)		Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t$ Tabla)

La Tabla 13 presenta los indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en Aquacrop, de los cuales se observa que el experimento sometido a condiciones de riego normal obtiene indicadores estadísticos más próximos a los valores óptimos en comparación a al experimento sometido a condiciones de riego reducido.

Tabla 13: Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en AquaCROP: Calibración con lámina normal (T₀) y Validación con lámina reducida (T₁)

Experimento	r	NRMSE	E	d
Calibración (L. Normal (T ₀))	0.95	17.7	0.85	0.97
Validación (L. Reducida (T ₁))	0.94	26.9	0.71	0.94
Óptimo esperado	1	0	1	1

Con los valores obtenidos en la Tabla 12 y la Tabla 13, se puede decir que con un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística t-Student, la correlación es positiva significativa para los dos experimentos, siendo el experimento de lámina normal con un r Pearson de 0.95 el que más aproxima los valores simulados a los observados para la curva del dosel. Mientras que los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) que varían entre 0.71 a 0.85 consideran la simulación, según la tabla de Molnar (2011), como “muy buena” a “excelente” y los valores de NRMSE que varían entre 17.7 a 26.9 consideran la simulación como “buena” a “aceptable”, de lo explicado se concluye que la simulación explica de manera eficiente la variabilidad de los datos de cobertura del dosel observados.

Debido a que el experimento de lámina normal arrojó indicadores estadísticos más cercanos a los ideales fue usado para la calibración mientras que el experimento de lámina reducida fue usado para la validación espacial.

La Figura 25 muestra el ajuste del valor medio de los datos observados a los datos simulados de la cobertura del dosel (CC) para los dos experimentos evaluados, mostrándose la variación temporal a lo largo del periodo del experimento (agosto 2013 – diciembre 2013).

El periodo más crítico en el cultivo de papa es el inicio de la tuberización (30 – 45 días después de la siembra), periodo en el cual la humedad del suelo debe ser la adecuada ya que un déficit de agua afectaría negativamente al rendimiento debido al estrés que provoca en la fisiología de la planta. La etapa de senescencia es menos sensible, siempre que el déficit no sea tan severo que acorte sustancialmente la duración del dosel verde. En 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).

La Figura 25 muestra que en el experimentos de lámina normal (Figura 25-a), la simulación no genera tendencias a la subestimación o sobrestimación a lo largo del período vegetativo del cultivo, sin embargo en el experimento de la lámina reducida (Figura 25-b) se genera una ligera sobreestimación entre los 60 – 88 días después de la siembra, esta sobreestimación se da en la etapa de llenado del tubérculo, etapa en la cual se redujo la lámina de riego, de esto se deduce que la lámina reducida la cual solo aseguro el 50% 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 mencionó anteriormente, el experimento de lámina reducida (Figura 25-b) generó sobreestimación del modelo para el periodo de llenado del tubérculo debido a que la lámina de riego aplicada (150 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 2) lo que generó en total un promedio de reducción en el rendimiento del cultivo de 10%.

Obsérvese gráficamente la relación entre las curvas de simuladas para los experimentos regados con lamina normal y lamina reducida, con las observaciones de campo obtenidas de las parcelas regadas con lamina normal y reducida a lo largo del periodo vegetativo del cultivo (Figura 25-a y Figura 25-b) respectivamente.

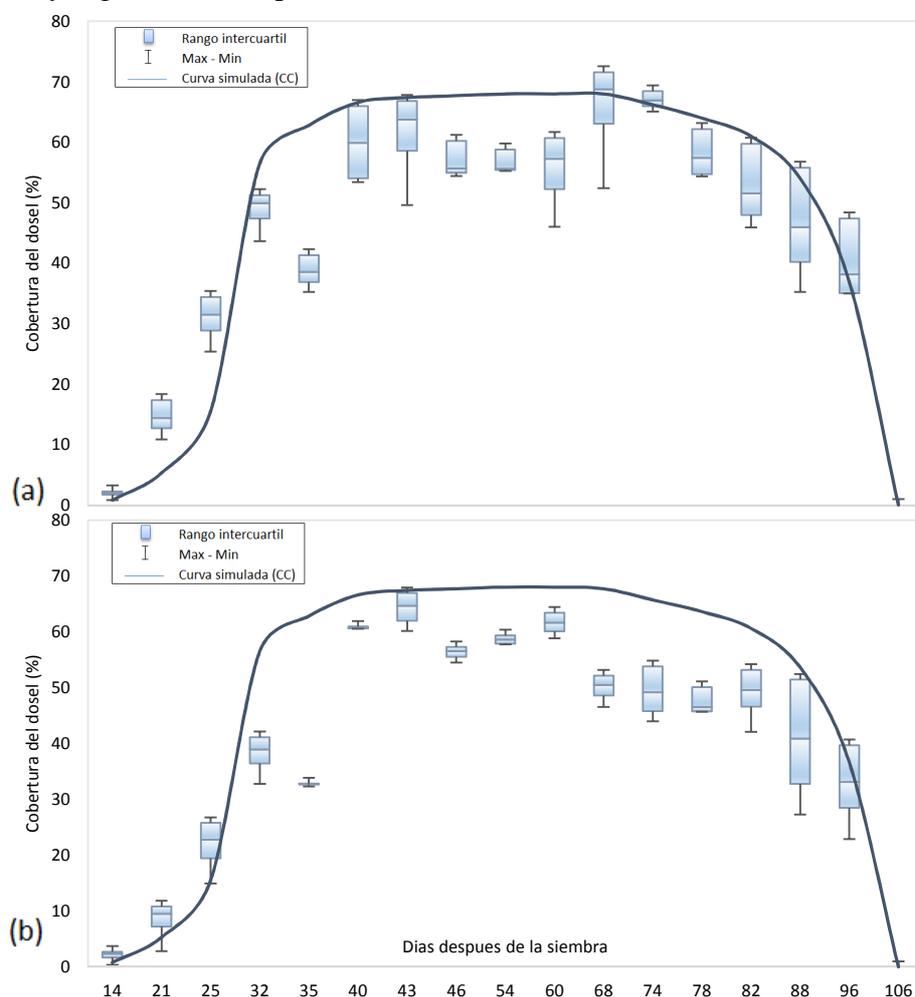


Figura 25: Variación temporal de la cobertura del dosel (%): Valores simulados por el modelo en línea azul, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con un total de 196 muestras por experimento: Experimento con lámina normal (a) y experimento con Lámina reducida (b). El boxplot representa el rango intercuartil, 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.

4.2.2. BIOMASA AÉREA SECA (BB)

La Tabla 14 presenta los indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la Biomasa aérea seca en Aquacrop, de los cuales se observa que el experimento sometido a condiciones normales de riego obtiene indicadores estadísticos más próximos a los valores ideales en comparación al experimento sometido a estrés hídrico.

Tabla 14: **Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la biomasa aérea seca en Aquacrop: Calibración con lámina normal (T₀) y Validación con lámina reducida (T₁)**

Calibración	r	NRMSE	E	d
Calibración (L. Normal (T ₀))	0.99	6.3	0.98	0.99
Validación (L. Reducida (T ₁))	0.97	9.5	0.95	0.99
Óptimo esperado	1	0	1	1

Con los valores obtenidos en la Tabla 14, se puede decir que, los valores del coeficiente de correlación de Pearson varían entre 0.97 a 0.99 lo cual indica que existe correlación positiva. Mientras que los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) que varían entre 0.95 a 0.98 consideran la simulación, según la tabla de Molnar (2011), como “excelente”, los valores de NRMSE que varían entre 6.3 a 9.5 consideran la simulación como “excelente” y los valores del índice de eficiencia de Willmott indican un buen ajuste, de lo explicado se concluye que la simulación explica de manera eficiente la variabilidad de los datos de Biomasa aérea seca observados. La Figura 26 muestra el ajuste del valor medio de los datos observados a los datos simulados de la biomasa aérea seca (BB) para cada uno de los experimentos evaluados, mostrándose la variación temporal a lo largo del periodo del experimento.

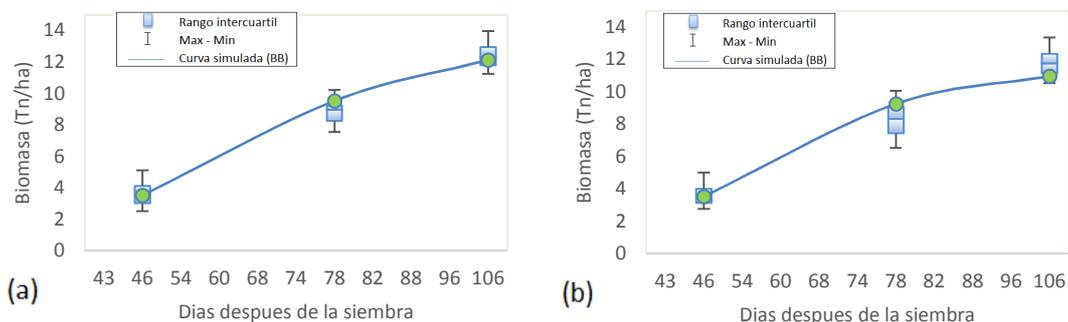


Figura 26: Variación temporal de la Biomasa seca por encima del nivel del suelo (Tn.ha⁻¹): Valores simulados por el modelo en línea celeste, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con un total de 15 muestras por experimento: Experimento con lámina normal (a), experimento con lámina reducida (b). El boxplot representa el rango intercuartil, 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

En la Tabla 15 se observan los valores de Biomasa aérea seca en $Tn.ha^{-1}$ obtenidos del campo el día de la cosecha y los valores simulados por el modelo, notándose una ligera subestimación para los dos experimentos, no obstante los valores simulados difieren en el rango de 0.26 a 0.77 $Tn.ha^{-1}$ con los valores observados lo cual refleja una buena estimación de la biomasa por parte del modelo agrometeorológico Aquacrop, siendo el experimento de lámina normal el que se asemeja más al observado en campo.

Tabla 15: Comparación entre Biomasa aérea seca ($Tn.ha^{-1}$) evaluada en la cosecha (14 de diciembre del 2013) y la simulada por el modelo agrometeorológico Aquacrop para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.

Experimento	Biomasa aérea seca ($Tn.ha^{-1}$)			Diferencia		
	Parcela	Observados	Promedio	Simulado	Absoluta	Porcentual
Calibración (L. Normal (To))	1T ₀	13.02				
		9.94				
		12.84				
	4T ₀	13.97				
		14.54	12.39	12.13	0.26	2.07
		10.63				
5T ₀	12.29					
	13.58					
	10.71					
Validación (L. Reducida (T1))	2T ₁	9.80				
		13.77				
		12.59				
	5T ₁	13.44				
		10.53	11.75	10.98	0.77	6.59
		10.87				
6T ₁	9.47					
	13.93					
		11.32				

4.2.3. RENDIMIENTO (Y)

La Tabla 16 muestra los rendimientos en peso fresco para los dos experimentos, obtenidos en campo el día de la cosecha (14 de diciembre del 2014). En dicha tabla, se puede observar que las diferencias entre los rendimientos de las parcelas regadas con lámina normal con respecto a las parcelas regadas con lámina reducida son mínimas, esto debido a que la lámina reducida aseguró el 100% de los requerimientos hídricos la primera mitad del desarrollo vegetativo y solo el 50% la segunda mitad del desarrollo vegetativo. Según Steduto, et al. (2012), los déficits hídricos en el cultivo de papa de la mitad y hacia el final del período de crecimiento suelen reducir el rendimiento menos que en la primera parte. Las parcelas regadas con lámina reducida generaron estrés hídrico por cierre estomático en la segunda mitad de desarrollo vegetativo, lo cual no afectó significativamente el rendimiento (Ver Anexo 2).

La metodología aplicada para la evaluación del rendimiento en campo fue explicada previamente.

Tabla 16: Rendimiento en peso fresco promedio de la papa variedad Única (Ton.ha⁻¹) por cada experimento: Experimento con lámina normal (T₀) y experimento con lámina reducida (T₁)

Experimento	Parcela	Rendimiento (Tn.ha ⁻¹)	Rendimiento Promedio (Tn.ha ⁻¹)
L. Normal	1T0	17.38	24.94
	2T0	22.49	
	3T0	25.53	
	4T0	17.30	
	5T0	38.17	
	6T0	21.13	
L. Reducida	1T1	25.94	23.63
	2T1	23.23	
	3T1	20.96	
	4T1	28.66	
	5T1	22.70	
	6T1	25.33	

Sin embargo, para la comparación con los rendimientos simulados en el modelo Aquacrop, los rendimientos evaluados en campo debieron ser llevados a una humedad de 0% o al peso seco, debido a que el modelo simula los rendimientos en esta condición de humedad. Los resultados evaluados en campo y los simulados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Comparación del rendimiento en la cosecha llevado a peso seco (14 de diciembre del 2013) y el rendimiento simulado por el modelo Aquacrop para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.

Experimento	Rendimiento (Tn.ha ⁻¹)		Diferencia	
	Observado	Simulado	Absoluta	Porcentual
Calibración (L. Normal (T ₀))	11.72*	11.77	-0.05	-0.43
Validación (L. Reducida (T ₁))	11.11*	10.57	0.54	4.86
Optimo esperado			0	0

*Valor en seco

En la Tabla 17 se observan los valores de rendimiento en peso seco obtenidos en campo (su procedimiento de obtención fue explicado en la metodología) y los rendimientos en peso seco simulados por el modelo, notándose una ligera sobreestimación para el experimento de lámina normal y una ligera subestimación para el experimento de lámina reducida, no obstante los valores simulados difieren en el rango de -0.05 a 0.54 Tn.ha⁻¹ con los valores observados lo cual refleja una buena estimación del rendimiento seco en Tn.ha⁻¹ por parte del modelo Aquacrop, siendo el experimento de lámina normal el que se asemeja más al observado en campo.

Para complementar la validación temporal del modelo agrometeorológico AquaCROP, se simularon rendimientos para el periodo 1997 – 2007 (con información climática para dicho periodo), debido a que AquaCROP simula los rendimientos en peso seco, estos fueron llevados a peso húmedo para ser comparados con los rendimientos históricos presentados en la Tabla 18, los cuales fueron obtenidos de la base de datos del Ministerio de Agricultura (MINAGRI). También se realizó la comparación de los rendimientos observados y simulados en la campaña de investigación (2013), con los rendimientos obtenidos del Centro Internacional de la Papa (CIP) y algunas tesis publicadas en la Biblioteca Agrícola Nacional.

Tabla 18: Rendimientos simulados por AquaCROP y Rendimientos promedio anual del cultivo de papa, obtenidos del Ministerio de Agricultura y Riego a partir de su página Web (http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult), del Centro Internacional de la Papa y Tesis de la Biblioteca Agrícola Nacional.

RENDIMIENTO EN TONELADAS POR HECTAREA (Tn.Ha ⁻¹)				
AÑOS	MINAGRI (LIMA) ¹	CIP (LA_MOLINA) ²	TESIS (LA_MOLINA) ³	AquaCROP (SIMULADO) ⁴
1997	18.10	---	---	23.21
1998	21.88	---	---	23.39
1999	19.76	---	---	23.49
2000	19.42	---	---	23.57
2001	20.47	---	---	23.66
2002	22.18	---	---	23.77
2003	23.10	---	---	23.91
2004	26.86	---	---	24.00
2005	25.42	---	---	24.12
2006	25.36	21.26	---	24.23
2007	24.18	---	45.00, 31.00	24.33
2008	23.77	---	---	---
2009	20.866	---	---	---
2010	25.605	---	---	---
2011	23.903	---	22.60, 15.00	---
2012	21.356	14.89, 16.88	---	24.91
2013	23.904	16.30, 27.51	40.00, 31.48	25.04, 22.49

Fuente: MINAGRI (2013) ⁽¹⁾, CIP (2013) ⁽²⁾, Yactayo (2011) ⁽³⁾, Rojas (2007) ⁽³⁾ y Meza (2013) ⁽³⁾

Rojas (2007), evaluó el rendimiento del cultivo de papa, variedad Única, aplicando riego por gravedad, para condiciones de La Molina, obteniendo rendimientos de 45.0 Tn.ha⁻¹ aplicando riego normal y 31.0 Tn.ha⁻¹ aplicando riego deficitario. Yactayo (2011), evaluó el rendimiento del cultivo de papa, variedad Única, en condiciones de invernadero, para La

Molina, obteniendo rendimientos de 22.6 Tn.ha⁻¹ aplicando riego normal y 15.0 Tn.ha⁻¹ aplicando riego deficitario. Meza (2013), evaluó el rendimiento del cultivo de papa, variedad Única, aplicando riego por goteo, para condiciones de La Molina, obteniendo rendimientos de 40.0 Tn.ha⁻¹ aplicando riego normal y 31.4 Tn.ha⁻¹ aplicando riego deficitario. El Centro Internacional de la papa (2013), obtuvo rendimientos experimentales del cultivo de papa, variedad Única, aplicando riego por goteo, para condiciones de La Molina, obteniendo rendimientos de 27.5 Tn.ha⁻¹ aplicando riego normal y 16.3 Tn.ha⁻¹ aplicando riego deficitario.

Como se mencionó anteriormente, en la presente investigación se obtuvieron rendimientos en campo de 24.94 y 23.63 Tn.ha⁻¹ y rendimientos simulados de 25.04 y 22.49 Tn.ha⁻¹, para los experimentos regados con lámina normal y reducida respectivamente, los cuales son muy cercanos a los rendimientos obtenidos por Yactayo (2011) y CIP (2013). Por otro lado, se observa que Rojas (2007) y Meza (2013), alcanzan rendimientos mayores aplicando riego por gravedad y goteo respectivamente. Las variaciones en los rendimientos pueden darse por múltiples factores, entre ellos, las características climáticas adecuadas para el desarrollo del cultivo son de vital importancia.

De la base de datos del Ministerio de Agricultura y Riego, se obtuvieron los rendimientos promedio anuales de las variedades de papa más comerciales para el área de Lima Metropolitana, estos rendimientos fueron comparados con los rendimientos simulados por el modelo Agrometeorológico AquaCROP para la temporada de 1997 – 2007, complementando así la validación temporal. Para cuantificar el grado de dependencia de los valores de rendimiento estimados por el modelo Agrometeorológico AquaCROP y los valores de rendimiento obtenidos de la base de datos del Ministerio de Agricultura (MINAGRI) para la temporada 1997 – 2007, se usó la prueba estadística T-Student, para un nivel de significancia del 5%, obteniéndose, como muestra la Tabla 19, una correlación positiva significativa para un coeficiente de correlación de Pearson de 0.85.

En la Figura 27, se muestra la distribución temporal de los rendimientos simulados por el modelo Agrometeorológico AquaCROP y los rendimientos observados de la base de datos del MINAGRI, CIP y algunas tesis de la Biblioteca Agrícola Nacional.

Tabla 19: Resultados de la prueba T-Student con un nivel de significancia del 5% para cuantificar el grado de dependencia de los rendimientos simulados y los rendimientos obtenidos del MINAGRI a partir de su página Web (http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult), para el periodo histórico (1997 – 2007).

Prueba estadística T - Student	Rendimiento Tn.ha ⁻¹ (1997 – 2007)	
	Simulados	Rendimientos MINAGRI
Media muestral (X)	11.18	11.22
Varianza muestral (S2)	0.03	2.0
Observaciones	11	11
Dif. Hipotética de las medias		0
Grados de libertad		20
Estadístico t		0.47
t Tabla ($\alpha=0.05$)		1.81

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

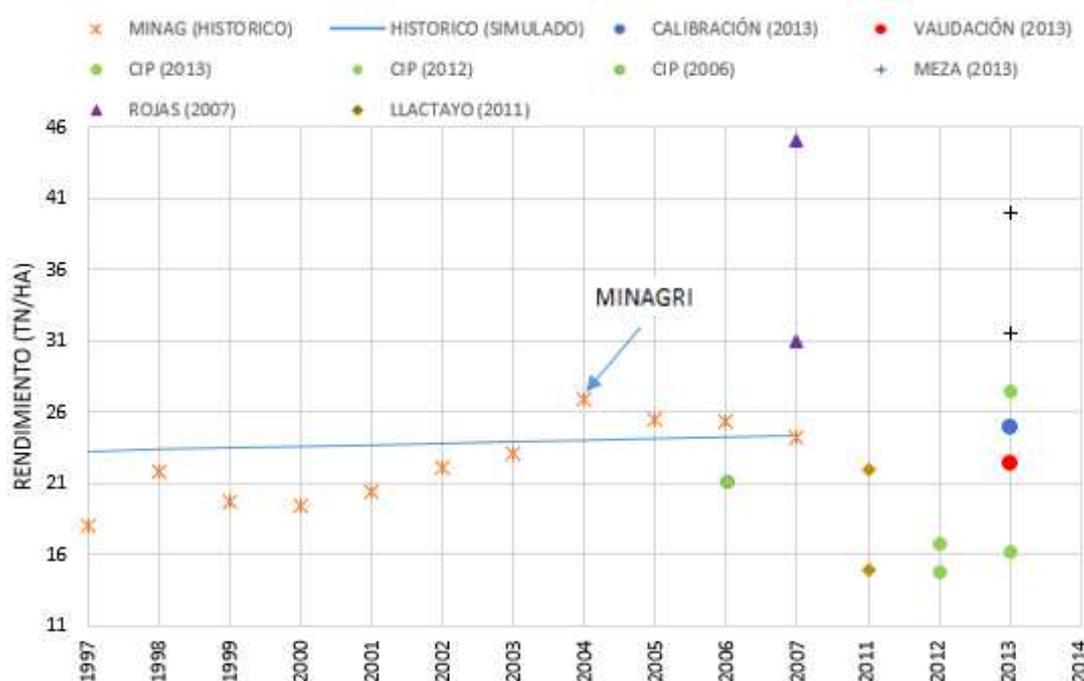


Figura 27: Los puntos naranja, verde, morado, marrón y negro representan los rendimientos obtenidos del MINAGRI (1997 – 2007), CIP (2006, 2012 y 2013), Rojas (2007), Yactayo (2011) y Meza (2013) respectivamente. La línea celeste representa los rendimientos simulados por AquaCROP (1997 – 2007), y los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos simulados para la calibración y validación del Modelo AquaCROP en la campaña de estudio 2013.

4.3. PROYECCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO DE LA PAPA VARIEDAD ÚNICA PARA EL PERIODO 2030 – 2050 Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En primer lugar se determinó el efecto del cambio climático en las proyecciones de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para el periodo de enero de 2030 a diciembre de 2050, el análisis se llevó a cabo en función al coeficiente de variación porcentual de la información climática histórica (1997 – 2007), el cual determino si la variación del valor proyectado era muy significativo, significativo o no significativo. Terminado el análisis se procedió a proyectar la evapotranspiración a partir de las proyecciones de temperatura máxima y temperatura mínima, se determinó el efecto del cambio climático en las proyecciones de evapotranspiración en función del coeficiente de variación porcentual de la evapotranspiración histórica (1997 – 2007). Finalmente se proyectó el rendimiento del cultivo de papa variedad única y se determinó el efecto del cambio climático en función al coeficiente de variación porcentual de los rendimientos simulados históricos (1997 – 2007).

4.3.1. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA FUTURA

a. Análisis de la Precipitación (PP)

En la Figura 28 se observa el comportamiento de la precipitación promedio mensual de los modelos de circulación general bajo la ruta representativa de concentración (RCP4.5 y RCP8.5) para el periodo (2030-2050) y la precipitación histórica del periodo (1997 – 2007), notándose incrementos de precipitación para el periodo proyectado.

Con respecto a la ruta de concentración RCP 4.5 los tres modelos sugieren una mayor precipitación todos los meses del año notándose cierta tendencia a producir mayor precipitación la segunda mitad del año (Junio – Diciembre). Se podría decir que el modelo MPI-ESM-MR sería el más favorable para la producción del cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina debido a que alcanza valores de precipitación más altos todo el año y más aún en la temporada de producción de papa (Agosto – Diciembre).

Con respecto a la ruta de concentración RCP 8.5 los tres modelos también sugieren una mayor precipitación todos los meses del año, a diferencia de los RCP4.5 que proyectan mayor precipitación la segunda mitad del año los RCP 8.5 proyectan una precipitación constante casi todo el año. El modelo MPI-ESM-MR alcanza los mayores valores de precipitación por lo cual sería el más favorable para la producción del cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina.

En general las proyecciones de precipitación para la ruta de concentración RCP4.5, fluctuaran entre 1 a 3 mm promedio mensual la primera mitad del año (Enero – Mayo) y entre 2 a 5 mm promedio mensual la segunda mitad del año (Junio – Diciembre), por su parte las precipitaciones para la ruta de concentración RCP8.5 fluctuaran entre 2 a 5 mm promedio mensual todo el año.

Como es sabido, los escenarios de cambio climático sugieren un incremento en la temperatura por lo mismo un incremento en la evapotranspiración lo cual generaría a su vez un mayor requerimiento en la lámina de riego para el manejo de un cultivo bajo condiciones de la La Molina (UNALM). Debido a que los tres modelos (CANESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-MR), sugieren un aumento de precipitación para las dos rutas de concentración RCP (4.5, 8.5), se podría decir que esta precipitación excedente podría autorregular en cierta medida los efectos del cambio climático aunque en general el aumento de 1 a 3 mm no es muy significativo.

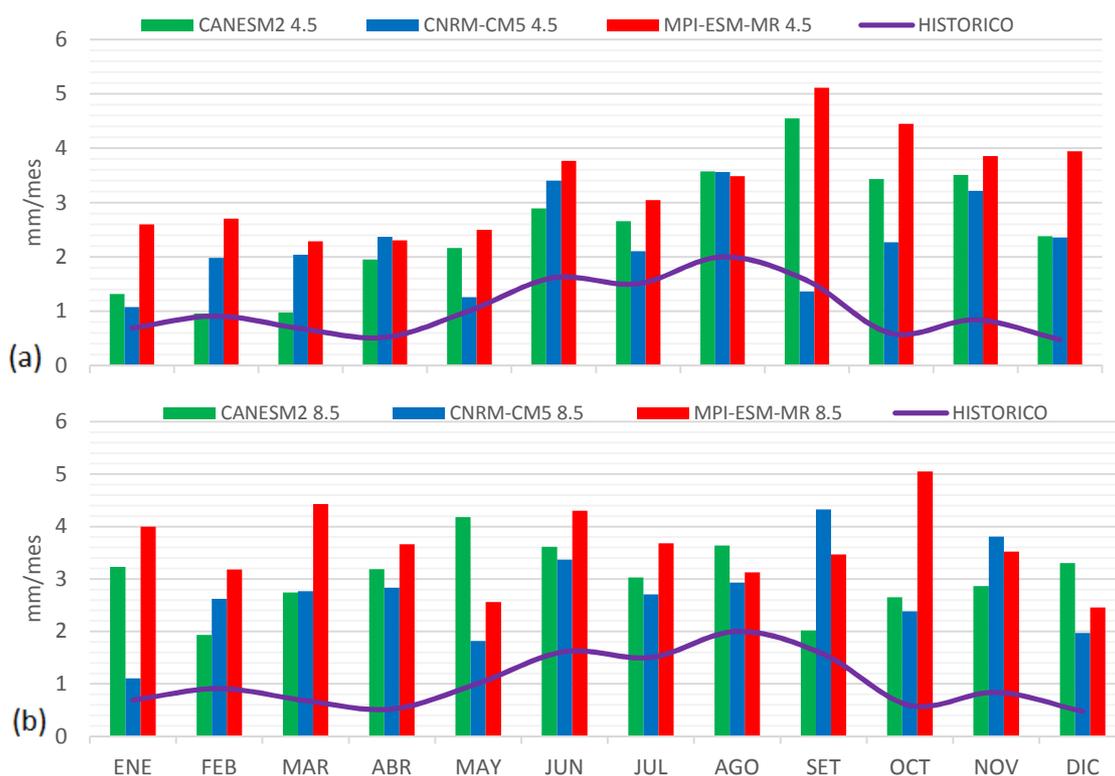


Figura 28: Diagrama de barras de la precipitación de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la precipitación mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 20 se muestra el análisis de variación porcentual de la precipitación proyectada en función de la precipitación histórica, observándose aumentos de precipitación muy significativos en los meses de Setiembre – Diciembre para la ruta de concentración RCP 4.5 y en los meses de Enero – Junio y Setiembre – Diciembre para la ruta de concentración RCP 8.5. Al observar las variaciones porcentuales de los tres modelos, se puede ver que el modelo MPI-EMS-MR obtiene los mayores valores para las dos rutas de concentración RCP, debido a esto se puede decir que serían los escenarios más favorables para la producción de cultivos bajo condiciones de la UNALM.

Al comparar las variaciones porcentuales de las dos rutas de concentración RCP, se puede notar que las variaciones porcentuales para la ruta de concentración RCP 8.5 son mayores que las variaciones porcentuales de la ruta de concentración RCP 4.5 (En mayor valor para los cinco primeros meses del año).

Tabla 20: Diferencia porcentual de la precipitación proyectada promedio mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.

Meses	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Ene	91%	56%	276%	368%	60%	480%
Feb	6%	118%	197%	113%	188%	250%
Mar	43%	200%	236%	303%	307%	551%
Abr	275%	355%	343%	513%	445%	604%
May	114%	25%	147%	314%	80%	154%
Jun	79%	111%	133%	124%	109%	166%
Jul	76%	40%	102%	101%	80%	145%
Ago	79%	78%	74%	82%	47%	56%
Sep	191%	-13%	227%	29%	176%	122%
Oct	481%	284%	654%	350%	305%	756%
Nov	318%	283%	359%	241%	353%	320%
Dic	402%	396%	731%	596%	315%	417%

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 la Figura 29 se observa la distribución de la precipitación total anual para el periodo histórico 1997 - 2007 y el periodo proyectado 2030 – 2050. Para la ruta de concentración RCP 4.5, el modelo MPI-ESM-MR sugiere una precipitación aproximada de 30 mm para inicios del año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 18

a 65 mm, al llegar al año 2050 la precipitación alcanzada es de 31 mm. El modelo CANESM2 sugiere una precipitación de 24 mm para el año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 15 a 59 mm y finalmente llega a un valor aproximado de 20 mm para el año 2050. El modelo CNRM-CM5 sugiere una precipitación de 39 mm para el año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 8 a 60 mm y finalmente llega a un valor aproximado de 33 mm para el año 2050.

Para la ruta de concentración RCP 8.5, el modelo MPI-ESM-MR sugiere una precipitación aproximada de 39 mm para inicios del año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 16 a 78 mm, al llegar al año 2050 la precipitación alcanzada es de 41 mm. El modelo CANESM2 sugiere una precipitación de 69 mm para el año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 17 a 64 mm y finalmente llega a un valor aproximado de 51 para el año 2050. El modelo CNRM-CM5 sugiere una precipitación de 29 mm para el año 2030, las fluctuaciones de precipitación entre los años 2030 – 2050 van desde los 7 a 71 mm y finalmente llega a un valor aproximado de 33mm para el año 2050.

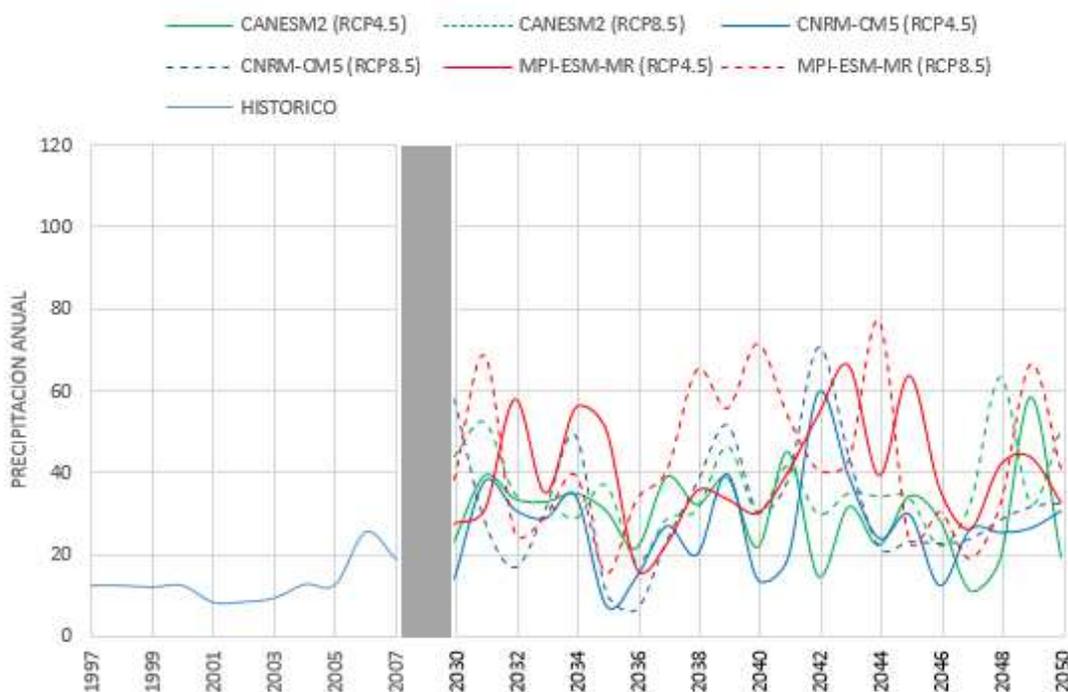


Figura 29: Proyecciones absolutas de precipitación acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la precipitación anual histórica del periodo 1997-2007. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. La franja ploma vertical marca el fin entre la precipitación histórica y el inicio de las proyecciones.

b. Análisis de la temperatura máxima

MINAGRI (2014), menciona que las temperaturas superiores a 30° C inhiben decididamente el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre donde la temperatura máxima o diurna se mantiene en promedio de 20° a 25° C. La variedad Única tiene atributos de resistencia climática lo que le permite una amplia adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas de la Costa.

En la Figura 30 se observa el comportamiento de la temperatura máxima mensual promedio de los modelos de circulación general bajo la ruta representativa de concentración (RCP4.5 y RCP8.5) durante el periodo 2030-2050, y la temperatura máxima mensual del periodo 1997 – 2007, notándose que las temperaturas máximas proyectadas se mantienen en un rango promedio de 22.8° a 25.5° C entre los meses de junio a noviembre, las cuales se encuentran dentro de la temperatura umbral óptima para producir el cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina. Se puede observar que las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), tienen la misma tendencia a aumentar la temperatura máxima entre los meses de mayo - diciembre y a mantenerse casi constante entre los meses de enero – abril. Respecto a los modelos de circulación global se observa que, el modelo CANESM2 alcanza las mayores temperaturas en las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) y el modelo CNRM-CM5 las menores.

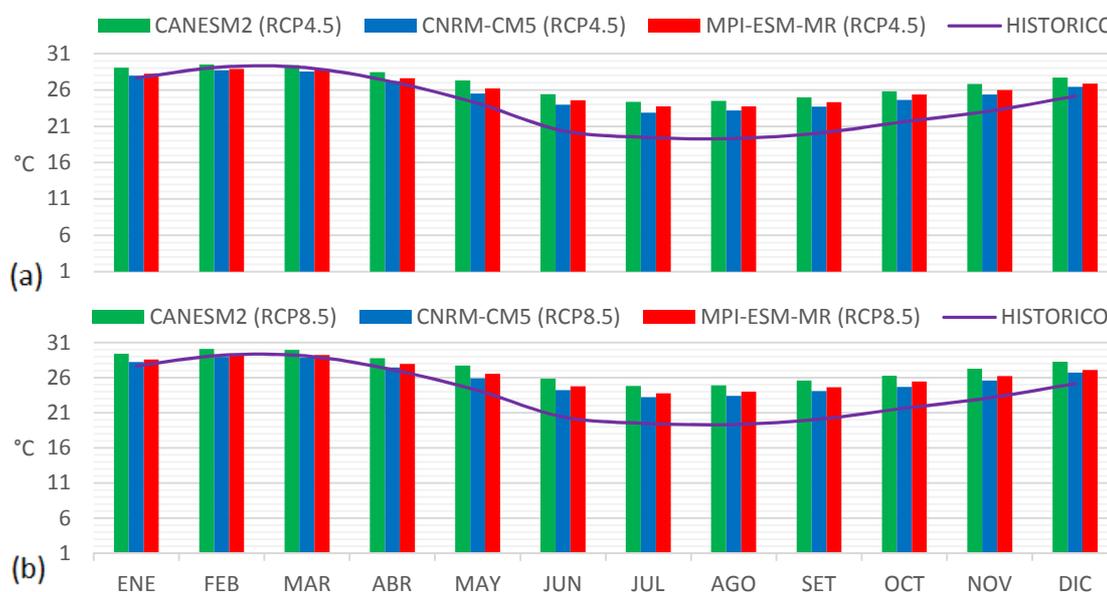


Figura 30: Diagrama de barras de la temperatura máxima de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la temperatura máxima mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 21 se muestra el análisis de variación porcentual de la temperatura máxima proyectada en función temperatura máxima histórica, observándose variaciones muy significativas entre los meses de junio – noviembre y variaciones significativas y no significativas entre los meses de enero – mayo.

Las dos rutas de concentración RCP (4.5 Y 8.5) tienen la misma tendencia a aumentar muy significativamente entre los meses de junio a noviembre, notándose mayores variaciones para los RCP 8.5 debido a que este escenario sugiere un incremento promedio mayor en 0.6° C con respecto a los RCP 4.5, hacia el 2050, con respecto a los meses de enero a mayo se observan ligeras variaciones para ambas rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), por lo que en dichos meses la temperatura máxima proyectada no variara significativamente con respecto a la histórica.

Como se mencionó anteriormente el modelo CANESM2 sugiere un mayor aumento en la temperatura máxima lo cual es comprobado debido a que tiene las mayores variaciones porcentuales la segunda mitad del año para las dos rutas de concentración RCP (4.5 Y 8.5) y el modelo CNRM-CM5 obtiene las menores variaciones también para las dos rutas de concentración RCP (4.5 Y 8.5).

Tabla 21: Diferencia porcentual de la temperatura máxima proyectada mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto temperatura máxima histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.

MES	Modelos climático y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Ene	5.08%	1.16%	2.11%	6.38%	2.03%	3.29%
Feb	1.18%	-1.53%	-0.94%	3.07%	-0.76%	0.27%
Mar	1.18%	-1.72%	-0.89%	2.95%	-0.67%	0.57%
Abr	4.86%	0.39%	1.84%	6.11%	1.20%	3.05%
May	12.95%	5.63%	8.45%	14.73%	7.13%	9.84%
Jun	24.58%	17.59%	20.50%	26.72%	18.72%	21.33%
Jul	25.33%	17.58%	21.97%	27.47%	19.35%	22.18%
Ago	26.76%	19.93%	22.83%	28.76%	21.06%	24.08%
Sep	24.52%	18.17%	21.31%	27.47%	19.92%	22.68%
Oct	19.38%	13.72%	17.21%	21.41%	13.98%	17.52%
Nov	16.21%	9.83%	12.50%	18.07%	10.64%	13.37%
Dic	10.23%	5.10%	6.97%	12.43%	6.20%	7.80%

 CAMBIO NO SIGNIFICATIVO ($X \in [-CV, CV]$)	 CAMBIO SIGNIFICATIVO ($X \in [-2CV, -CV > U < CV, 2CV]$)	 CAMBIO MUY SIGNIFICATIVO ($X \in [-\infty, -2CV > U < 2CV, +\infty]$)
--	---	--

c. Análisis de la temperatura mínima

MINAGRI (2014), menciona que las temperaturas inferiores a 8° C inhiben decididamente el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre cuando la temperatura mínima o nocturna se mantiene en promedio de 8° a 13° C. Debido a que la variedad Única tiene atributos de resistencia climática puede tuberizar óptimamente hasta con temperaturas de 16° C (Vásquez, 2003).

En la Figura 31 se observa el comportamiento de la temperatura mínima mensual de los modelos de circulación general bajo la ruta representativa de concentración (RCP4.5 y RCP8.5) durante el periodo 2030-2050 y la temperatura mínima mensual del periodo 1997 – 2007, notándose que las temperaturas mínimas proyectadas se mantienen en un rango promedio de 13.5° a 16.5° C las cuales se encuentran dentro de la temperatura umbral óptima para producir el cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina. Se puede observar que las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), tienen la misma tendencia a aumentar ligeramente entre los meses de enero – mayo y a mantenerse casi constante entre los meses de junio – diciembre. Respecto a los modelos de circulación global se observa que, el modelo CANESM2 alcanza las mayores temperaturas en los dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) y el modelo CNRM-CM5 las menores temperaturas.

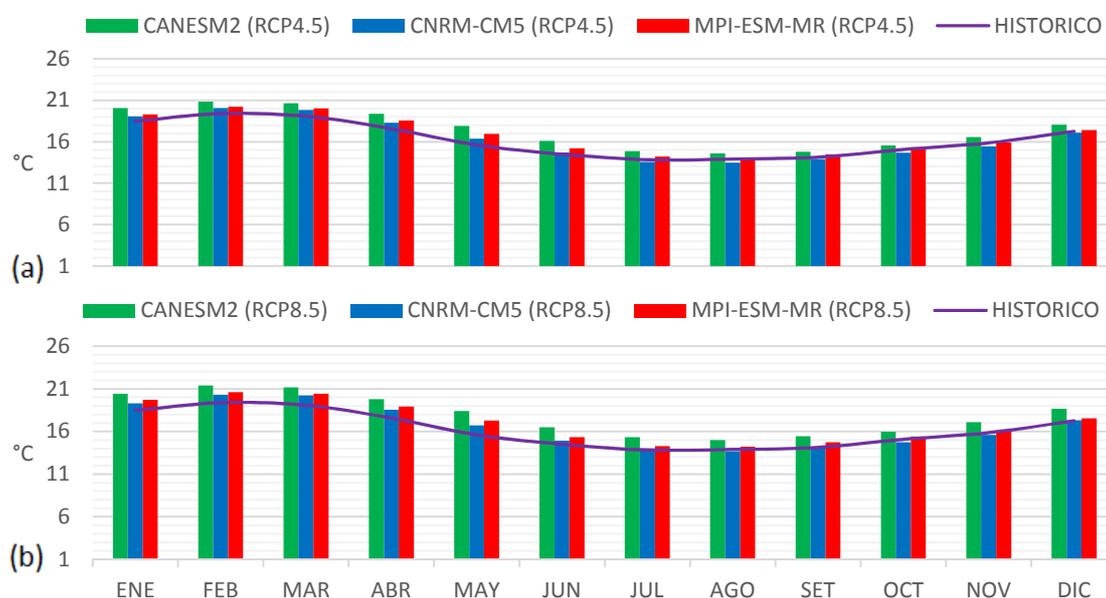


Figura 31: Diagrama de barras de la temperatura mínima de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la temperatura mínima mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 22 se muestra el análisis de variación porcentual de la temperatura mínima proyectada en función temperatura mínima histórica, observándose variaciones significativas y no significativas entre los meses de enero – junio y por lo general variaciones no significativas entre los meses de julio – diciembre.

Las dos rutas de concentración RCP (4.5 Y 8.5) tienen la misma tendencia a aumentar entre los meses de enero a mayo, notándose mayores variaciones por parte de los RCP 8.5 debido a que este escenario sugiere un incremento promedio mayor en 0.6° C con respecto a los RCP 4.5, hacia el 2050, con respecto a los meses de junio a diciembre se observan ligeras variaciones para ambas rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), por lo que en dichos meses la temperatura mínima proyectada no variara significativamente con respecto a la histórica.

Con respecto a los modelos de circulación general, el modelo CANESM2 sugiere un mayor aumento en la temperatura mínima en todos los meses del año, lo cual es comprobado debido a que tiene las mayores variaciones porcentuales para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) y el modelo CNRM-CM5 obtiene las menores variaciones todos los meses del año también para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5).

Tabla 22: Diferencia porcentual de la temperatura mínima proyectada mensual (Del año 2030 al 2050) con respecto a la temperatura mínima histórico mensual (Del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.

MES	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Ene	8.55%	3.17%	4.47%	10.73%	4.47%	6.77%
Feb	7.39%	3.46%	4.29%	10.42%	4.81%	6.28%
Mar	8.17%	3.99%	4.88%	11.06%	6.00%	7.05%
Abr	10.21%	4.11%	5.64%	12.66%	5.49%	7.81%
May	14.68%	4.77%	8.44%	17.80%	7.00%	10.81%
Jun	11.10%	1.49%	4.87%	13.93%	3.00%	5.91%
Jul	7.63%	-2.05%	2.67%	10.98%	-0.38%	3.26%
Ago	5.09%	-2.96%	0.16%	8.02%	-1.52%	2.32%
Sep	4.69%	-1.72%	2.39%	9.40%	0.53%	4.36%
Oct	3.13%	-2.75%	1.50%	6.08%	-2.33%	2.28%
Nov	4.37%	-2.69%	0.43%	7.82%	-1.53%	1.62%
Dic	4.68%	-0.94%	0.84%	8.13%	0.29%	1.70%

<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; display: inline-block; margin-right: 5px;"></div> CAMBIO NO SIGNIFICATIVO $(X \in [-CV, CV])$	<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; display: inline-block; margin-right: 5px;"></div> CAMBIO SIGNIFICATIVO $(X \in [-2CV, -CV > U < CV, 2CV])$	<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; background-color: #666666; display: inline-block; margin-right: 5px;"></div> CAMBIO MUY SIGNIFICATIVO $(X \in [-\infty, -2CV > U < 2CV, +\infty])$
--	--	---

4.3.2. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PROYECCIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RENDIMIENTO DE LA PAPA VARIEDAD ÚNICA

a. Efecto del cambio climático en las proyecciones de evapotranspiración de referencia

En la Figura 32 se observa el comportamiento de la evapotranspiración promedio mensual de los modelos de circulación general bajo la ruta representativa de concentración (RCP4.5 y RCP 8.5) para el periodo (2030-2050), y la evapotranspiración promedio mensual histórica del periodo (1997 – 2007), notándose incrementos de evapotranspiración proyectada con respecto a la histórica entre los meses de mayo a diciembre.

Se puede notar que las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), tienen la misma tendencia a aumentar entre los meses de mayo a diciembre y a mantenerse casi constante entre los meses de enero – abril, los incrementos de evapotranspiración entre los meses de mayo – diciembre son mayores para el escenario RCP 8.5 ya que de acuerdo al análisis de la temperatura realizado previamente, este sugiere un mayor incremento lo cual se traduce en una mayor producción de evapotranspiración. Respecto a los modelos de circulación global se observa que, el modelo CANESM2 alcanza los mayores valores de evapotranspiración en las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) y el modelo CNRM-CM5 alcanza los menores valores en las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5).

Bajo condiciones de La Molina, la evapotranspiración futura generaría un mayor requerimiento hídrico de los cultivos cuya campaña se da en la segunda mitad del año (junio – diciembre), esto llevaría a una modificación en la cantidad de lámina de riego aplicada por campaña, ya que de no compensarse el desbalance hídrico producido por el incremento de la evapotranspiración, la planta sufriría estrés hídrico causando una caída en el rendimiento óptimo esperado. Como se observó en la sección de análisis de la precipitación, los seis escenarios de cambio climático proyectan variaciones positivas de precipitación para todos los meses del año, por lo que se podría suponer que esta precipitación excedente autorregularía los efectos del incremento de evapotranspiración, de ser así no sería necesario modificar la lámina de riego y en el mejor de los casos se podría reducir dicha lamina. Esto será observado en mayor medida al simular el modelo agrometeorológico AquaCROP con las proyecciones climática y al determinar en qué medida afecta el aumento de la evapotranspiración a la producción del cultivo.

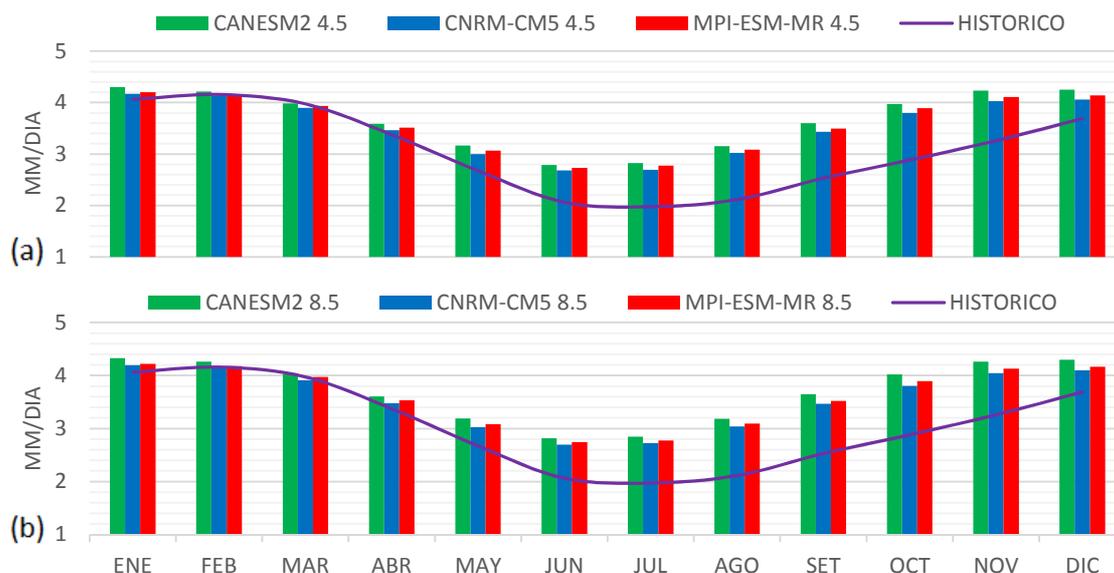


Figura 32: Diagrama de barras de la evapotranspiración de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la evapotranspiración mensual histórica para el periodo de Enero 1997 a Diciembre del 2007 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 23 se muestra el análisis de variación porcentual de la evapotranspiración proyectada en función de la evapotranspiración histórica, observándose variaciones muy significativas entre los meses de mayo – diciembre y por lo general variaciones no significativas entre los meses de enero – abril.

Para la ruta de concentración RCP 4.5, el modelo CANESM2 presenta variaciones no significativas en los meses de febrero y marzo, variaciones significativas enero y abril, y variaciones muy significativas entre los meses de mayo – diciembre. El modelo CNRM-CM5 presenta variaciones no significativas en los meses de enero – abril, variaciones significativas en los meses de mayo y diciembre, y variaciones muy significativas en los meses de junio – noviembre. El modelo MPI-ESM-MR presenta variaciones no significativas en los meses de enero – marzo, variaciones significativas el mes de abril, y variaciones muy significativas los meses de mayo – diciembre.

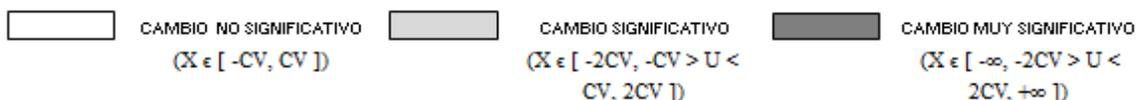
Para la ruta de concentración RCP 8.5, el modelo CANESM2 presenta variaciones no significativas en los meses de febrero y marzo, variaciones significativas enero y abril, y variaciones muy significativas entre los meses de mayo – diciembre. El modelo CNRM-CM5 presenta variaciones no significativas en los meses de enero – abril, variaciones significativas en el mes de diciembre, y variaciones muy significativas en los meses de mayo a noviembre.

El modelo MPI-ESM-MR presenta variaciones no significativas en los meses de enero – marzo, variaciones significativas en el mes de abril, y variaciones muy significativas los meses de mayo – diciembre.

Las dos rutas de concentración (RCP 4.5 y RCP 8.5) alcanzan su mayor variación porcentual positiva en el mes de agosto llegando la ruta de concentración RCP 4.5 a 49.33% para el modelo CANESM2, 42.97% para el modelo CNRM-CM5 y 45.90% para el modelo MPI-ESM-MR y en la ruta de concentración RCP 8.5 a 50.74% para el modelo CANESM2, 43.94% para el modelo CNRM-CM5 y 46.54% para el modelo MPI-ESM-MR.

Tabla 23: Diferencia porcentual de la evapotranspiración proyectada promedio mensual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico mensual (periodo del año 1997 al 2007) en la estación meteorológica Von Humboldt.

MES	Modelos climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Ene	5.89%	2.72%	3.49%	6.58%	3.34%	3.86%
Feb	1.29%	-0.72%	-0.25%	2.43%	-0.37%	0.42%
Mar	0.24%	-1.95%	-1.05%	1.27%	-1.57%	-0.02%
Abr	6.34%	2.61%	4.16%	6.78%	3.06%	4.76%
May	18.32%	12.11%	14.61%	19.31%	13.22%	15.41%
Jun	34.96%	29.78%	32.42%	36.65%	30.68%	33.11%
Jul	43.02%	36.33%	40.70%	44.33%	38.26%	40.63%
Ago	49.33%	42.97%	45.90%	50.74%	43.94%	46.54%
Sep	42.34%	35.70%	38.27%	44.17%	37.16%	39.28%
Oct	37.82%	31.82%	35.06%	39.37%	31.99%	35.04%
Nov	29.97%	23.49%	26.09%	30.83%	24.11%	26.77%
Dic	15.16%	10.07%	12.12%	16.52%	11.13%	12.97%



En la Figura 33 se observa la distribución de la evapotranspiración total anual para el periodo histórico 1997 – 2007 y el periodo proyectado 2030 – 2050, notándose que las proyecciones para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) y sus tres modelos de circulación general (CANESM2, CNRM-CM5 Y MPI-SMR-MR) alcanzan valores superiores con respecto a la evapotranspiración total anual histórica.

A nivel anual se observa que las diferencias entre las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 son mínimas ya que el escenario RCP 4.5 sugiere un incremento promedio de 1.4° C y el escenario RCP 8.5 un incremento de 2° C, ambos hacia 2050.

Las proyecciones anuales de evapotranspiración para los escenarios RCP 4.5, variarían en un rango de 1276.16 – 1383.40 mm, al analizar el incremento de la evapotranspiración obtenida para el año 2050 con respecto a la obtenida el año 2030, se obtiene que los modelos CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, aumentan en 17.88, 6.32 y 34.69 mm respectivamente. Por su parte Las proyecciones anuales de evapotranspiración para los escenarios RCP 8.5, variarían en un rango de 1277.57 – 1394.468 mm, al analizar el incremento de la evapotranspiración obtenida para el año 2050 con respecto a la obtenida el año 2030, se obtiene que los modelos CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, aumentan en 35.87, 17.78 y 37.50 mm respectivamente.

De lo mencionado en el párrafo anterior se entiende que los escenarios RCP 8.5, con el paso del tiempo provocarían un mayor incremento de temperatura por consiguiente de evapotranspiración con respecto a los escenarios RCP 4.5.

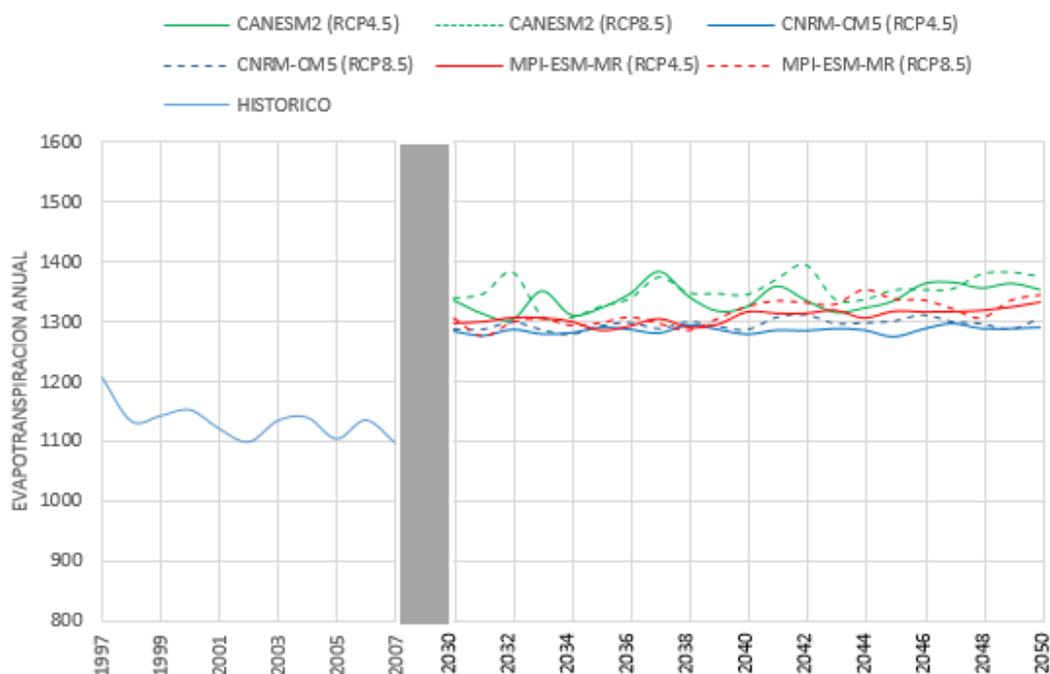


Figura 33: Proyecciones absolutas de evapotranspiración acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la evapotranspiración anual histórica del periodo 1997-2007. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. La franja ploma vertical señala el fin de la evapotranspiración histórica y el inicio de las proyecciones.

b. Efecto del cambio climático en las proyecciones de rendimiento del cultivo de papa variedad Única

Con la información climática proyectada de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y evapotranspiración para el periodo 2030 – 2050, se simuló el modelo agrometeorológico AquaCROP obteniéndose rendimientos en peso seco ya que el modelo simula los rendimientos en dicha condición, estos rendimientos fueron llevados a su peso fresco aumentándole su porcentaje de humedad.

En la Figura 34 se observan los rendimientos en peso fresco simulados por el modelo agrometeorológico AquaCROP para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5) en el periodo proyectado 2030 – 2050, los rendimientos en peso fresco obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo Agrometeorológico AquaCROP en el periodo 2013 y los rendimientos en peso fresco simulados para el periodo 1997 - 2007. La primera simulación de los rendimientos futuros se realizaron con la lámina normal de riego usada para la calibración, la cual fue de 242 mm por campaña, los resultados de los rendimientos obtenidos nos indican que las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), sugieren un ligero aumento en el rendimiento del cultivo con respecto al rendimiento obtenido en la campaña de estudio 2013 (25.05 Tn.ha⁻¹) y a los rendimientos simulados para el periodo 1997 – 2007. Se puede decir que las proyecciones de precipitación autorregularían los efectos del incremento de la temperatura en la mayoría de los años, a pesar de esto se observan caídas de rendimiento en los años más extremos.

Respecto a la comparación de los resultados obtenidos para los seis escenarios de cambio climático, se observa que los valores de rendimiento más bajos son obtenidos del escenario MPI-ESM-MR (RCP 8.5) en los años 2038 – 2041, 2048 y 2050, ya que en estos años dicho escenario climático sugiere los mayores índices de evapotranspiración para los meses de Julio – Diciembre (superando incluso a los modelos CANESM2 y CNRM-CM5), meses en los cuales la producción del cultivo de papa variedad Única es propicia bajo condiciones de La Molina. En conclusión, los rendimientos estimados para los seis escenarios de cambio climático manejando el cultivo con la lámina de riego actual, fluctuaran en un intervalo de 23.88 a 27.88 Tn.ha⁻¹ obtenidos de los escenarios MPI-ESM-MR (RCP8.5) y CANESM2 (RCP4.5) respectivamente, lo cual nos indica que las condiciones climáticas futuras no serán muy adversas para la producción del cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina. No obstante, será necesario probar nuevas láminas de riego para atenuar el estrés hídrico y así mejorar las caídas de rendimiento observadas en la Figura 34.

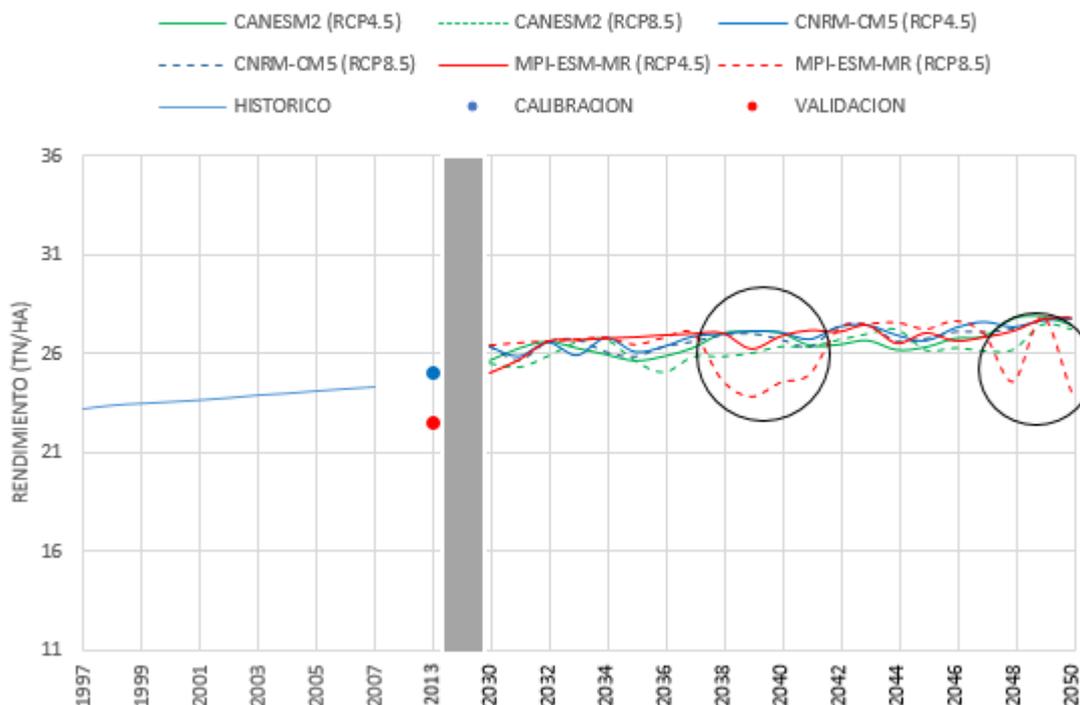


Figura 34: Proyecciones de rendimiento en peso fresco del cultivo de papa Variedad Única para el periodo 2030-2050 con respecto a los rendimientos en peso fresco simulados para periodo 1997-2007, en celeste. Las líneas continuas corresponden al escenario RCP4.5 y discontinuas al escenario RCP8.5. Los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos en peso fresco simulados para la calibración y validación respectivamente en el periodo 2013. La franja ploma vertical señala el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

En la Tabla 24 se presentan los rendimientos máximos y mínimos obtenidos al simular el modelo agrometeorológico AquaCROP con la data climática proveniente de los seis escenarios de cambio climático (2030 – 2050), observándose que el rendimiento más alto es alcanzado por el escenario CANESM2 (RCP 4.5) y el más bajo por el escenario MPI-ESM-MR (RCP 8.5).

Tabla 24: Valores máximos y mínimos del rendimiento simulados con la lámina de riego de 242 mm para el periodo 2030-2050

Escenarios	Rendimientos (2030-2050) (Tn.ha ⁻¹)	
	máxima	mínima
CANESM2 (RCP 4.5)	27.88	25.60
CANESM2 (RCP 8.5)	27.47	23.88
CNRM-CM5 (RCP 4.5)	27.76	25.81
CNRM-CM5 (RCP 8.5)	27.84	25.64
MPI-ESM-MR (RCP 4.5)	27.83	25.01
MPI-ESM-MR (RCP 8.5)	27.81	23.88

Se realizó el análisis de variación porcentual de los rendimientos simulados futuros (2030 – 2050) para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), el análisis se llevó a cabo en función del coeficiente de variación porcentual de los rendimientos simulados históricos (1997 – 2007), con él se determinó el impacto del cambio climático en la producción del cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina.

En la Tabla 25 se observan que las variaciones porcentuales de los rendimientos simulados futuros con respecto a los rendimientos simulados históricos, son positivas para los seis escenarios, lo que nos indica que las condiciones climáticas futuras no serán muy adversas para la producción del cultivo de papa variedad Única bajo condiciones de La Molina. Se observa que los menores porcentajes de variación son obtenidos de la ruta de concentración (RCP 8.5) debido a que este escenario sugiere un mayor incremento de temperatura.

Tabla 25: Diferencia porcentual del rendimiento simulado para el periodo 2030 - 2050 con respecto al rendimiento simulado para el periodo del año 1997 - 2007.

MODELOS	Escenarios		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Simulación Histórica (1997 - 2007) (RCP 4.5)	11.71%	13.01%	12.76%
Simulación Histórica (1997 - 2007) (RCP 8.5)	10.41%	12.54%	10.49%

CAMBIO NO SIGNIFICATIVO ($X \in [-CV, CV]$)	CAMBIO SIGNIFICATIVO ($X \in [-2CV, -CV > U < CV, 2CV]$)	CAMBIO MUY SIGNIFICATIVO ($X \in [-\infty, -2CV > U < 2CV, +\infty]$)
--	---	--

Con el afán de probar en qué medida se podía atenuar el estrés hídrico en los años más extremos y así mejorar los rendimientos mínimos obtenidos en la simulación, se realizaron simulaciones modificando la lámina de riego.

Las primeras simulaciones se realizaron disminuyendo la lámina de riego, esto provocó que el estrés hídrico en la planta aumente significativamente, lo cual condujo a una reducción en el rendimiento del cultivo. Las siguientes pruebas se realizaron aumentando la lámina de riego obteniéndose así mejoras en los rendimientos mínimos obtenidos de la primera simulación. Se realizaron numerosas simulaciones para determinar en qué medida se podía aumentar la lámina de riego, ya que un exceso de agua en el cultivo también genera estrés hídrico. Se llegó a la conclusión de aumentar 50 mm más de lámina de riego distribuidas en 20 eventos de riego a partir de la floración de la planta. Esto provocó un aumento en el rendimiento para los años que presentaban los valores más bajos (observar Figuras 34 y 35).

En la Figura 35 se puede observar que con la nueva lámina de riego de 292 mm, los años que obtuvieron rendimientos máximos no sufren repercusión alguna ya que en dichos años el incremento de la precipitación estaría autorregulando efectivamente el incremento de la evapotranspiración y el incremento en la lámina de riego no es tan grande como para producir estrés hídrico por exceso de agua, por otro lado los rendimientos mínimos se ven mejorados ya que el incremento de la precipitación en dichos años no cubrió por completo los requerimientos hídricos de la planta y con los 50 mm adicionales en la lámina de riego se redujo el estrés hídrico observándose mejoras en los rendimientos mínimos en un rango de 1.92 a 3.09 Tn.ha⁻¹ para el escenario MPI-ESM-MR (RCP 8.5).

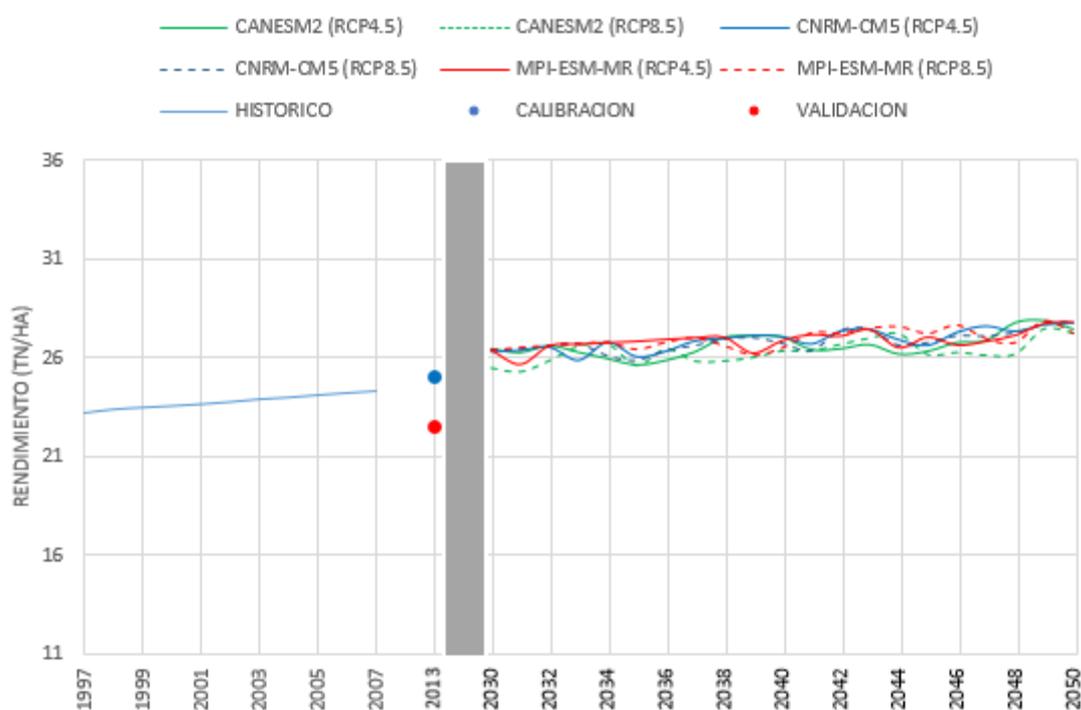


Figura 35: Proyecciones de rendimiento en peso fresco del cultivo de papa Variedad Única para el periodo 2030-2050 con respecto a los rendimientos en peso fresco simulados del periodo 1997-2007, en celeste. Las líneas continuas corresponden al escenario RCP4.5 y discontinuas al escenario RCP8.5. Los puntos azul y rojo corresponden a los rendimientos en peso fresco simulados para la calibración y validación respectivamente en el periodo 2013. La franja ploma vertical señala el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

En la Tabla 26 se observan los rendimientos máximos y mínimos obtenidos de los seis escenarios al modificar la lámina de riego, notándose como se mencionó anteriormente que el incremento en la lámina de riego no repercute en los rendimiento máximos ya que se mantienen constantes con respecto a la Tabla 24, por otro lado los rendimientos mínimos son los más favorecidos ya que se obtienen mejores rendimientos.

Tabla 26: Valores máximos y mínimos del rendimiento simulado con la lámina de riego de 292 mm para el periodo 2030-2050

Escenarios	Rendimientos (2030-2050) (Tn.ha ⁻¹)	
	máxima	mínima
CANESM2 (RCP 4.5)	27.88	26.43
CANESM2 (RCP 8.5)	27.47	26.45
CNRM-CM5 (RCP 4.5)	27.76	26.38
CNRM-CM5 (RCP 8.5)	27.84	26.38
MPI-ESM-MR (RCP 4.5)	27.83	26.40
MPI-ESM-MR (RCP 8.5)	27.81	26.19

Se realizó nuevamente el análisis de variación porcentual de los rendimientos simulados futuros (2030 – 2050) para las dos rutas de concentración RCP (4.5 y 8.5), el análisis se llevó a cabo en función del coeficiente de variación porcentual de los rendimientos simulados históricos (1997 – 2007), con él se determinó el impacto del cambio climático en los rendimientos simulados por el modelo agrometeorológico AquaCROP modificando la lámina de riego.

En la Tabla 27 se puede notar un ligero aumento en las variaciones porcentuales con respecto a las variaciones obtenidas en la Tabla 25, lo cual indica que el cambio de lámina de riego provoca un impacto positivo en el rendimiento del cultivo atenuando el estrés hídrico producido por el cambio climático en los años más extremos.

Tabla 27: Diferencia porcentual del rendimiento simulado modificando la lámina de riego para el periodo 2030 - 2050 con respecto al rendimiento simulado para el periodo del año 1997 - 2007.

MODELOS	Escenarios RCP 4.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Simulación Histórica (1997 - 2007) (RCP 4.5)	14.36%	14.41%	14.39%
Simulación Histórica (1997 - 2007) (RCP8.5)	14.29%	14.38%	13.68%

CAMBIO NO SIGNIFICATIVO ($X \in [-CV, CV]$)
 CAMBIO SIGNIFICATIVO ($X \in [-2CV, -CV > U < CV, 2CV]$)
 CAMBIO MUY SIGNIFICATIVO ($X \in [-\infty, -2CV > U < 2CV, +\infty]$)

V. CONCLUSIONES

Se realizaron las 6 proyecciones de evapotranspiración y rendimiento hacia el año 2050. En base a estas proyecciones, se determinaron los efectos del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad Única, para así cumplir con los objetivos del presente estudio.

- 1) Las proyecciones de evapotranspiración fueron estimadas a partir de las variables de temperatura máxima y mínima, empleando la ecuación de Hargreaves calibrada para condiciones de La Molina. Con respecto a las proyecciones de temperatura máxima se determinaron incrementos muy significativos entre los meses de mayo a diciembre, por otro lado las proyecciones de temperatura mínima no mostraron variaciones significativas. Las variaciones en la temperatura, provocarían incrementos de hasta 50% en la evapotranspiración, entre los meses de mayo a diciembre. De lo mencionado se concluye que en un futuro los déficits hídricos serán mayores para los seis escenarios de cambio climático, lo cual es evidencia de una necesaria modificación en las láminas de riego futuras.
- 2) Los incrementos en las proyecciones de precipitación provocarían un efecto positivo en el cultivo, ya que regularían en cierta medida los efectos del incremento de la temperatura. Por su parte las temperaturas proyectadas, se encontrarían dentro del rango de las óptimas para el desarrollo vegetativo del cultivo, no obstante provocarían mayores requerimientos hídricos. Se proyectaron los rendimientos con el modelo AquaCROP calibrado, aplicando un riego de $2420 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, observándose años en que el incremento de la precipitación estaría regulando el déficit hídrico producido por el incremento de la temperatura, también se obtienen años con estrés hídrico, debido a esto se optó por incrementar la lámina de riego en $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, mejorándose así los rendimientos más bajos. De lo mencionado se concluye que las condiciones de La Molina para la producción del cultivo de papa Variedad Única ante los seis escenarios de cambio climático no serán muy adversas, no obstante será necesario modificar la lámina de riego en los años más extremos a riegos de $2920 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

- 3) Del seguimiento en campo se obtuvieron rendimientos promedio de 24.94 y 23.63 Tn.ha⁻¹, aplicando riego por goteo en condiciones normales y deficitarias, con volúmenes de 2420 y 1500 m³.ha⁻¹ respectivamente, en un suelo franco arenoso y bajo las condiciones climáticas de La Molina. Se determinó que el experimento regado con lamina normal alcanzó valores ligeramente mayores en cobertura del dosel, profundidad de raíces y producción de biomasa, con respecto al experimento regado con lámina reducida. Obtenida la información de campo a lo largo del periodo vegetativo del cultivo, se elaboró la estructura de entrada del modelo agrometeorológico AquaCROP.
- 4) La eficiencia de la modelación según la escala propuesta por Molnar (2011), fue de excelente a buena para la calibración y validación espacial, con valores de (0.85 y 0.71) para índice de Nash–Sutcliffe, también se obtuvieron valores de (17.7, 26.9) para el NRMSE. Además, para evaluar el grado de dependencia entre la información observada en campo y simulada por el modelo, se obtuvo valores del coeficiente de Pearson entre 0.94 a 0.95, que indica una correlación significativa positiva para un nivel de significancia del 5%. Por otro lado, se realizó una validación temporal para el periodo de 1997 al 2007 con información estadística del MINAGRI, obteniéndose valores del coeficiente de Pearson de 0.85, que indica una correlación significativa positiva para un nivel de significancia del 5%. De lo mencionado se concluye que el modelo agrometeorológico AquaCROP, puede simular acertadamente el desarrollo de la cobertura del dosel y el rendimiento para el cultivo de papa, variedad Única, bajo condiciones de La Molina.

VI. RECOMENDACIONES

- Para un mejor ajuste regional del coeficiente empírico de la ecuación de Hargreaves, se recomienda comparar los resultados obtenidos por dicha ecuación, con los resultados obtenidos con el tanque evaporímetro.
- Promover la producción de la variedad Única, ya que es una variedad mejorada por el Centro Internacional de la Papa, la cual presenta características de resistencia y precocidad que le permiten una amplia distribución geográfica tanto en la sierra como en la costa.
- Seguir validando el modelo agrometeorológico AquaCROP, con más campañas de campo y modificando las fechas de siembra, para así determinar una fecha adecuada la cual conlleve a la obtención de mejores rendimientos del cultivo.
- Realizar este tipo de investigación ante diferentes climas, para las variedades de papa más comerciales a nivel nacional, con la finalidad de planificar políticas sectoriales en todos los niveles de gobierno que ayuden a mejorar la producción nacional y tomar decisiones ante los efectos del cambio climático.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abtew, W., Obeysekera, J. 1995. Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods. *Transactions of the ASAE* 38(1): 121-129.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje Manual 56. Roma.
- Amador, A., Rivera, R. 2008. Predicción Estacional del Clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica.
- Bradford, K.J., y Hsiao.T.C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. p. 263–324. En: O.L. Lange et al. (ed.) *Physiological plantecology. II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series. Vol. 12B.* Springer-Verlag, New York.
- Canales, M. O. B. G. 2009. Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos. Instituto Nacional de Innovación Agraria – Instituto Geofísico del Perú.
- Doorenbos, J., and Kassam, A., with Bentvelsen, C., Branscheid, V., Plusje, J. Smith, M., Uittenbogaard, G., Van Der Val, H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), no. 33.* Land and Water Development Div., Rome, Italy. 193 p.
- Egúsqüiza, B. R. 2000. La papa: producción, transformación y comercialización.
- Gangopadhyaya, M. 1965. Evaporation – Its Measurement and Estimation. *Symposium; desing of hydrological networks* 2: 507.
- Gong, L., Xu, C. Y., Chen, D., Halldin, S., Chen, Y. D. 2006. Sensitivity of the Penman – Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of hydrology* 329(3): 620 – 629.

- Gutiérrez, R., Espinoza, J. y Bonierbale, M. 2007. ÚNICA: Variedad Peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1): 41-50
- Hargreaves, G. & Samani, Z. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.* 96-99.
- Hirsh, R., Helsel, D., Cohn, T. & Gilroy, E. 1992. *Handbook of Hydrology*. s.l.: McGraw-Hill.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24:519–570.
- Hsiao, T.C., E. Fereres, E. Acevedo, and D.W. Henderson. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. p. 281–305.
- Imark, S., Haman, D. Z. (2003). *Evapotranspiration: potential or reference*. IFAS Extention, ABE 343.
- Immerzeel, W. 2008. *Spatial modelling of mountainous basins, an integrated analysis of the hydrological cycle, climate and agriculture*. Utrecht University, Royal Dutch Geographical Society.
- 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. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- 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 Qin, D. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., Allen, R. G. 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. NY: American Society of Civil Engineers Manual of Practice No. 70.
- Meza, A. R. 2013. *Evaluación del Rendimiento del cultivo de papa bajo la aplicación de una estrategia de riego deficitario (PRD) utilizando cintas de Riego*. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola. UNALM. Lima – Perú.

- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2014. Papa. Principales aspectos agroeconómicos. Consultado 20 feb. 2015. Disponible en http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/2014/papa_2014.pdf
- Molnar, P. 2011. "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental. Zürich. Switzerland.
- Moriasi, D. y otros. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3). 885-900.
- Nash, J. & Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1-A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10(3). 282-290.
- 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.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R. G., Alves, I. 1999. Evapotranspiration: Conceptos and future trends. *Journal of irrigation and drainage engineering* 125(2): 45 – 51.
- Raes, D. Steduto, Hsiao, T.C., Fereres, E. 2012. Reference Manual AquaCrop 4.0, FAO, Rome. Website: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- Raes, D., Steduto, P. Hsiao, T. C, y Fereres. E. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description *Agron. J.* 101: 438-447.
- Rojas, N. G. 2007. Secado Parcial de Raíces: Promisoria Técnica de Riego Evaluada en papa. Tesis para optar el Grado de Magister Scientiae. UNALM. Lima – Perú.
- Samani, Z. 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4). 265-267.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2009. Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2015. Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú. Lima.

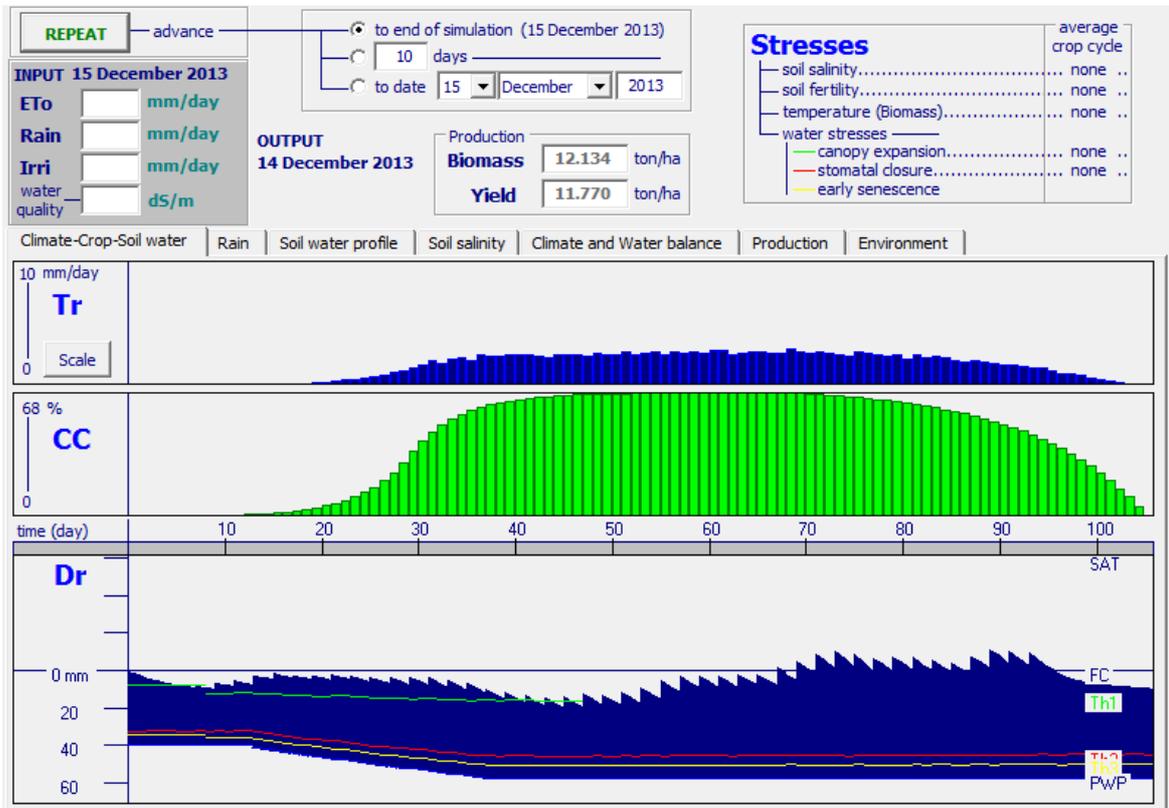
- Soil Conservation Service. 1991. Soil – Plant – Water relationships. Section 15. Irrigation, p. 111-156. En National engineering handbook. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Solanas, A., Salafranca, L., Fauquet, J. y Núñez, M. I. 2005. Estadística descriptiva en Ciencias del Comportamiento. Madrid: Thompson.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes D., y Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles Agron. J. 2009 101: 426-437.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. & Raes, D. 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper 66. Roma.
- Vásquez, E. 2003. Influencia de los Factores Ambientales en la Predicción del Comportamiento de los Clones de Papa para la Costa del Perú. Universidad Nacional Agraria “La Molina”. Lima, Perú. 102 p.
- Willmott, C. J. 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. In Spatial Statistics and Models, Gaile GL, Willmott CJ (eds). D. Reidel: Boston. 443–460.
- Yactayo, G. W. 2012. Estudio de la Eficiencia de uso de Agua de la planta de papa en respuesta a la aplicación de diferentes niveles de láminas de riego utilizando el riego parcial en condiciones de Invierno. Tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola. UNALM. Lima – Perú.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN PERIODO 2013

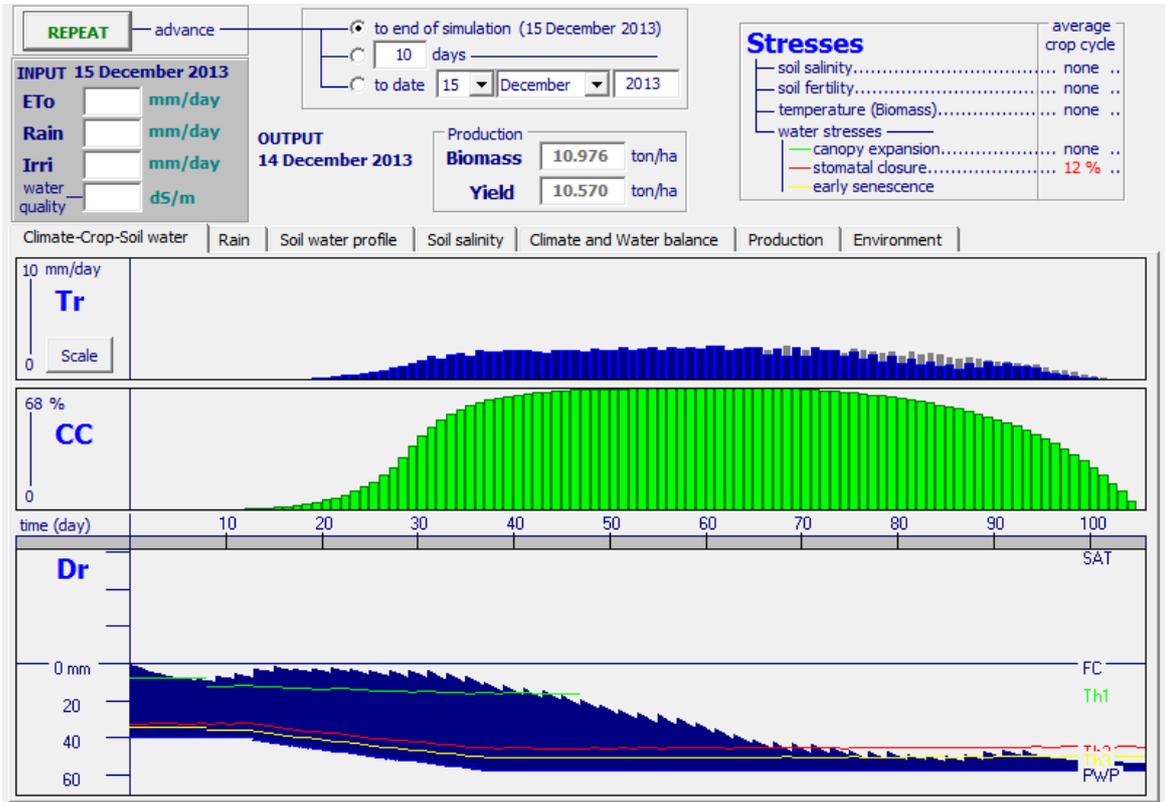
(Lámina óptima)



ANEXO 2

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA VALIDACIÓN PERIODO 2013

(Lámina reducida)



ANEXO 3

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUA DE RIEGO APLICADA AL CAMPO EXPERIMENTAL OBTENIDO DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES DE LA UNALM

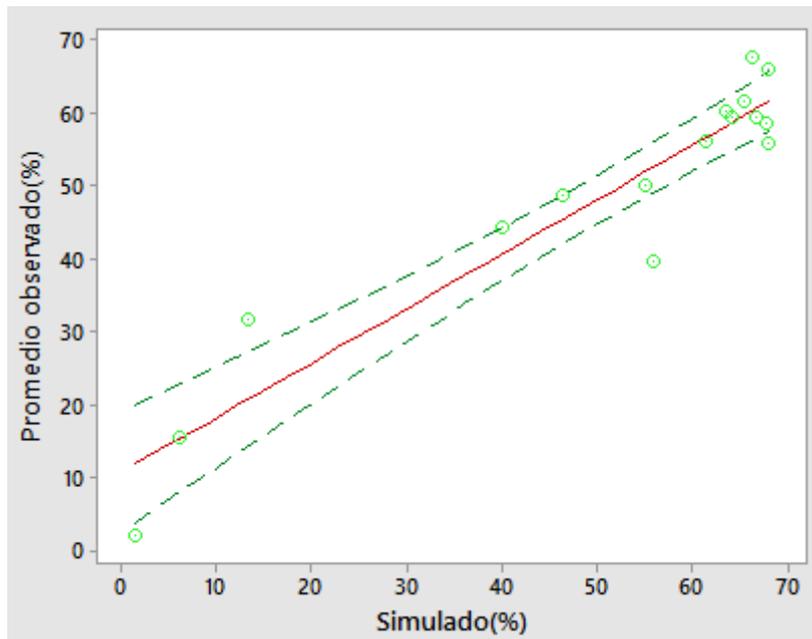
	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES																																							
ANALISIS DE AGUA																																								
SOLICITANTE :	FUNDO UNALM																																							
PROCEDENCIA :	LIMA/ LIMA/ LA MOLINA																																							
REFERENCIA :	H.R. 43513																																							
<table border="1"><thead><tr><th>No. Laboratorio</th><th>006</th></tr><tr><th>No. Campo</th><th>Agua de Pozo Azahares</th></tr></thead><tbody><tr><td>pH</td><td>7.08</td></tr><tr><td>C.E. dS/m</td><td>0.57</td></tr><tr><td>Calcio meq/L</td><td>4.67</td></tr><tr><td>Magnesio meq/L</td><td>0.66</td></tr><tr><td>Potasio meq/L</td><td>0.09</td></tr><tr><td>Sodio meq/L</td><td>0.68</td></tr><tr><td>SUMA DE CATIONES</td><td>6.10</td></tr><tr><td>Nitratos meq/L</td><td>0.04</td></tr><tr><td>Carbonatos meq/L</td><td>0.00</td></tr><tr><td>Bicarbonatos meq/L</td><td>2.41</td></tr><tr><td>Sulfatos meq/L</td><td>1.46</td></tr><tr><td>Cloruros meq/L</td><td>2.50</td></tr><tr><td>SUMA DE ANIONES</td><td>6.41</td></tr><tr><td>Sodio %</td><td>11.15</td></tr><tr><td>RAS</td><td>0.42</td></tr><tr><td>Boro ppm</td><td>0.13</td></tr><tr><td>Clasificación</td><td>C2-S1</td></tr></tbody></table>			No. Laboratorio	006	No. Campo	Agua de Pozo Azahares	pH	7.08	C.E. dS/m	0.57	Calcio meq/L	4.67	Magnesio meq/L	0.66	Potasio meq/L	0.09	Sodio meq/L	0.68	SUMA DE CATIONES	6.10	Nitratos meq/L	0.04	Carbonatos meq/L	0.00	Bicarbonatos meq/L	2.41	Sulfatos meq/L	1.46	Cloruros meq/L	2.50	SUMA DE ANIONES	6.41	Sodio %	11.15	RAS	0.42	Boro ppm	0.13	Clasificación	C2-S1
No. Laboratorio	006																																							
No. Campo	Agua de Pozo Azahares																																							
pH	7.08																																							
C.E. dS/m	0.57																																							
Calcio meq/L	4.67																																							
Magnesio meq/L	0.66																																							
Potasio meq/L	0.09																																							
Sodio meq/L	0.68																																							
SUMA DE CATIONES	6.10																																							
Nitratos meq/L	0.04																																							
Carbonatos meq/L	0.00																																							
Bicarbonatos meq/L	2.41																																							
Sulfatos meq/L	1.46																																							
Cloruros meq/L	2.50																																							
SUMA DE ANIONES	6.41																																							
Sodio %	11.15																																							
RAS	0.42																																							
Boro ppm	0.13																																							
Clasificación	C2-S1																																							
La Molina, 13 de Enero del 2014																																								
 <i>Eddy García Bendezi</i> Jefe del Laboratorio																																								
Av. La Molina s/n Campus UNALM Telf.: 614-7800 Anexo 222 Telefax: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe																																								

ANEXO 4

VALORES DE COBERTURA DEL DOSEL EVALUADOS DURANTE EL PERIODO VEGETATIVO DEL CULTIVO COMPARADOS CON VALORES SIMULADOS POR AQUACROP MEDIANTE R PEARSON

(Lámina óptima)

DDS	COBERTURA DEL DOSEL (LAMINA OPTIMA)												Promedio Observado	Simulado
	1To			3To			4To			5To				
14	2.8	3.2	2.0	1.0	1.5	1.3	0.4	4.0	1.7	3.1	4.7	0.9	2.2	1.5
21	14.1	14.7	11.2	9.0	11.0	12.5	8.0	23.9	14.6	32.8	20.9	15.3	15.7	6.1
25	33.9	37.6	27.3	23.5	30.6	21.9	16.3	41.4	32.4	51.4	38.8	26.4	31.8	13.4
32	47.0	54.3	44.6	40.1	48.7	42.1	46.2	64.4	44.1	61.1	53.1	39.2	48.7	46.4
35	38.2	40.4	40.4	30.8	44.9	36.6	32.4	32.4	40.8	53.3	33.7	51.9	39.7	56.0
40	59.0	52.6	48.7	55.8	75.7	65.1	60.6	76.6	64.6	71.9	60.4	30.5	60.1	63.5
43	63.6	64.3	56.9	68.1	73.2	67.3	38.0	40.0	70.8	72.8	62.8	62.2	61.7	65.5
46	55.1	53.1	55.0	53.3	54.0	58.1	58.4	56.7	53.5	65.6	62.0	89.2	59.5	66.6
54	54.1	56.5	55.1	54.6	53.9	58.8	58.0	56.6	51.7	67.8	61.6	74.1	58.6	67.7
60	46.5	55.8	60.7	60.1	62.0	58.4	63.3	60.7	63.0	37.6	49.6	50.9	55.7	67.9
68	67.9	73.1	71.8	75.5	73.0	72.0	77.4	64.8	57.5	46.8	60.4	50.0	65.9	68.0
74	75.9	63.9	59.1	68.7	79.0	47.6	70.9	71.2	60.6	73.8	78.5	60.8	67.5	66.2
78	48.8	59.0	56.7	57.9	69.1	53.1	68.4	44.0	50.7	65.2	65.6	75.2	59.5	64.2
82	46.5	57.6	59.4	30.7	61.2	45.9	67.7	44.6	33.7	80.3	72.3	74.1	56.2	61.5
88	52.5	49.2	48.5	27.0	67.7	11.0	56.4	29.4	39.7	70.1	76.3	72.4	50.0	55.1
96	45.2	40.9	37.6	23.4	74.3	7.3	45.2	14.3	45.7	59.8	67.0	70.7	44.3	40.0

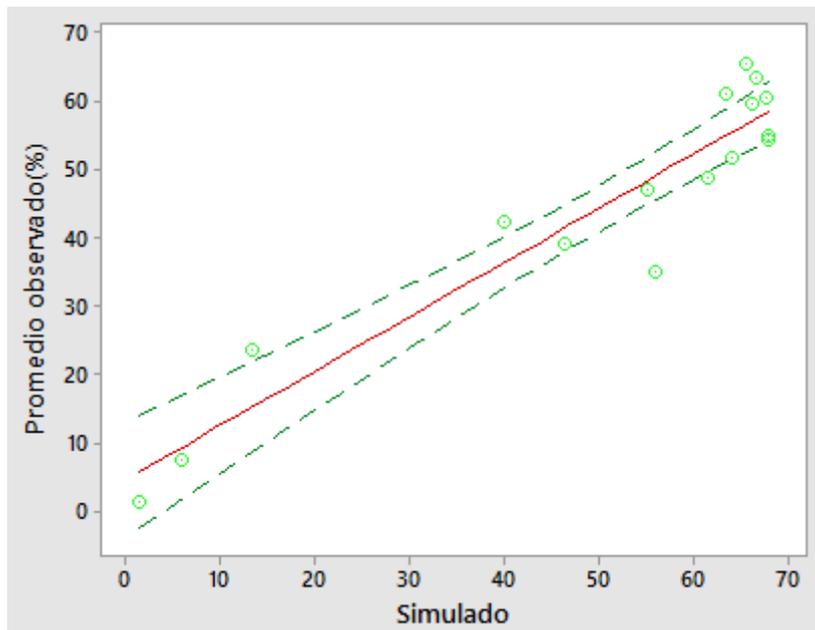


— Regresión
- - - IC de 95%

CONTINUACIÓN

(Lámina reducida)

DDS	COBERTURA DEL DOSEL (LAMINA REDUCIDA)												Promedio Observado	Simulado
	1To			3To			4To			5To				
14	0.5	0.7	0.4	2.7	1.8	1.2	2.5	1.0	0.8	1.5	1.4	0.9	1.3	1.5
21	4.4	1.5	2.6	21.9	6.5	8.4	13.4	5.8	4.2	5.7	4.7	9.6	7.4	6.1
25	20.1	12.7	12.0	38.1	23.8	26.0	33.0	21.6	19.4	20.8	30.7	26.7	23.7	13.4
32	36.7	31.4	30.1	51.4	39.3	40.2	49.7	37.1	35.1	37.6	38.5	41.8	39.1	46.4
35	33.1	35.0	30.4	32.8	35.3	28.8	36.8	29.3	28.8	52.0	46.2	33.7	35.2	56.0
40	59.7	65.8	56.1	60.6	66.6	54.7	65.3	53.6	55.0	70.5	67.6	56.2	61.0	63.5
43	70.1	56.6	60.9	62.9	76.3	63.4	75.9	54.6	56.7	79.2	72.8	58.2	65.6	65.5
46	57.8	54.9	54.9	53.6	64.1	54.0	66.5	69.8	68.0	80.8	66.8	69.2	63.4	66.6
54	57.6	56.7	63.5	53.0	62.7	58.0	67.1	69.7	65.1	66.0	51.9	53.6	60.4	67.7
60	72.9	58.1	64.8	53.5	70.0	57.9	34.4	62.3	47.5	46.1	46.1	39.0	54.4	67.9
68	53.1	64.6	37.5	45.7	56.4	58.3	23.3	75.6	71.1	51.5	66.0	58.2	55.1	68.0
74	59.0	73.1	46.2	36.5	49.2	53.5	86.8	72.7	54.1	75.5	47.6	61.5	59.6	66.2
78	55.4	63.8	56.3	21.8	59.2	56.0	42.8	64.7	48.1	53.1	48.8	50.5	51.7	64.2
82	68.3	58.2	52.1	43.0	49.2	34.1	34.3	55.1	43.0	53.4	49.2	47.2	48.9	61.5
88	58.3	81.9	52.6	7.1	44.1	30.8	35.9	58.9	49.8	52.6	45.4	47.8	47.1	55.1
96	48.3	55.6	49.8	2.2	39.0	27.5	37.6	52.7	56.6	51.9	41.7	46.6	42.4	40.0



ANEXO 5

ESTACIONES CON PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA LA INTERPOLACIÓN

ESTACIONES PARA LA INTERPOLACIÓN					
ESTE	NORTE	PARA LA PRECIPITACIÓN	ESTE	NORTE	PARA LA TEMPERATURA
221359.3	8777272.1	ALCANTARILLA	269046.3	8733385.1	HUAYAN
269046.3	8733385.1	HUAYAN	299756.2	8674016.4	ÑAÑA
318447.7	8681934.3	SANTA EULALIA	221359.3	8777272.1	ALCANTARILLA
336714.5	8663753.2	ANTIOQUIA	395588.3	8478330.4	HACIENDA BERNALES

Fuente: SENAMHI (2013)

ANEXO 6

PRECIPITACIÓN HISTÓRICA PARA EL PERIODO 1997 – 2007, OBTENIDA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA VON HUMBOLDT

AÑO	PRECIPITACION HISTORICA (1997 - 2007) mm/mes											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1997	0	0	0	0.3	1.7	0.2	0.2	2	6.4	0.1	1.9	0.1
1998	2	1.5	4.1	0.2	3.2	3.9	4.5	3.6	1.2	1.2	0.3	0.1
1999	0	4	0	0	0.2	3.9	4.5	3.6	1.2	1.2	0.3	0.1
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	3.8	0.2	0.1	5.2	2.7	1.2	1	4.4	1.2	0.8	0	0
2002	0.5	0.9	0.5	1	3	2.1	0.5	3.9	1.9	0.2	3.9	0
2003	3.4	1.5	0.8	0.2	0	0	1.3	1.4	1	0.1	0.7	2.1
2004	0.4	2.2	0.2	0.8	0.7	1.8	0.4	0.4	0.4	0.1	1.6	0.3
2005	0.1	1.1	0.4	0	0	0.9	2.3	0.7	2.6	0.3	1.6	0.1
2006	0.5	0	1	0	0.3	0.1	1.1	1.4	1.1	1.3	0.8	0.3
2007	0.2	0	0.5	0.6	0.7	1.6	1.4	2.1	1.1	1.1	0.8	0.5

Fuente: Estación meteorológica Von Humboldt

ANEXO 7

TEMPERATURA MÁXIMA MENSUAL HISTÓRICA PARA EL PERIODO 1997 – 2007, OBTENIDA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA VON HUMBOLDT

AÑO	TEMPERATURA MENSUAL MAXIMA HISTORICA (1997 - 2007) EN °C											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1997	27.07	28.71	28.70	26.20	25.62	25.05	24.54	23.55	23.65	23.75	25.62	28.07
1998	29.89	31.09	31.43	29.60	24.67	21.96	20.55	19.34	20.39	21.44	22.91	25.18
1999	27.27	28.85	28.56	26.52	24.25	20.70	19.10	19.43	20.68	22.11	22.97	24.69
2000	27.25	29.03	28.99	28.04	27.86	19.49	18.68	19.35	20.59	21.72	23.14	24.95
2001	27.63	29.33	30.08	27.41	22.62	18.88	18.12	18.82	19.66	21.00	22.78	24.95
2002	26.81	29.07	29.03	26.79	24.66	19.59	17.73	17.59	19.71	22.02	22.70	24.94
2003	26.81	29.26	28.77	26.17	23.34	20.54	19.84	19.27	19.69	22.09	23.92	25.14
2004	27.70	29.08	28.87	27.00	23.32	18.75	19.33	19.18	19.53	21.68	22.53	25.27
2005	27.92	28.30	28.30	26.95	22.05	19.21	18.59	19.52	18.20	20.40	22.35	24.70
2006	27.95	29.40	28.91	26.77	23.97	20.58	20.19	19.57	20.66	21.95	23.12	24.41
2007	27.72	28.78	28.02	26.77	23.47	19.53	17.35	16.87	17.94	19.88	22.07	24.12

Fuente: Estación meteorológica Von Humboldt

ANEXO 8

TEMPERATURA MÍNIMA MENSUAL HISTÓRICA PARA EL PERIODO 1997 – 2007, OBTENIDA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA VON HUMBOLDT

AÑO	TEMPERATURA MENSUAL MINIMA HISTORICA (1997 - 2007) EN °C											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1997	15.19	16.15	16.44	18.26	18.01	18.94	19.03	18.81	18.11	17.15	18.79	21.08
1998	22.98	23.55	22.50	20.06	17.80	16.61	15.32	14.34	14.05	14.80	15.99	17.20
1999	18.33	21.00	19.79	17.80	15.16	13.71	13.56	13.92	13.58	14.72	15.21	16.76
2000	19.37	19.93	19.12	18.38	18.15	14.55	14.19	14.09	13.78	14.57	14.33	17.31
2001	19.09	20.56	20.14	18.29	15.48	13.94	13.71	13.37	13.31	14.13	15.28	16.47
2002	18.21	20.01	20.68	18.74	15.96	13.75	13.73	13.51	13.79	14.82	16.02	17.06
2003	19.62	20.65	19.40	16.60	15.46	13.44	14.01	13.39	13.81	14.62	15.80	17.74
2004	19.24	19.96	19.37	17.14	13.81	13.32	13.35	13.12	14.15	13.88	15.39	17.40
2005	19.73	19.57	18.79	17.49	14.69	13.84	13.79	13.05	13.07	13.35	14.32	17.49
2006	19.24	20.60	19.81	17.00	13.36	14.04	15.27	15.03	14.43	15.18	15.92	17.67
2007	19.95	19.68	19.71	17.21	13.85	12.52	13.03	12.50	12.46	12.77	14.19	16.12

Fuente: Estación meteorológica Von Humboldt