

TESIS DE MAESTRÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Título:

“Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo, Ecuador”

Autor: Edgar Alexis Uquillas Romo

Director de Tesis: Dra. Gabriela Lakkis

Codirector de Tesis: Dr. Adrián Yuchechechen

Buenos Aires - 2019

DEDICATORIA

A mis padres por haberme guiado paso a paso hasta convertirme en la persona que soy al presente, motivándome día a día a conseguir mis metas y anhelos, la gran mayoría de logros se los debo a ustedes incluyendo este.

Quiero agradecerles por todo, no me alcanzan las palabras para expresar el amor y orgullo que siento por tener un hogar tan maravilloso.

Gracias Padre y Madre.

ÍNDICE

	A	
Anexos		97
	C	
CAPÍTULO 1		19
CAPÍTULO 2		39
CAPÍTULO 3		49
Conclusiones		90
	I	
Introducción al tema de tesis		15
	O	
Objetivos de la investigación		18
	R	
Recomendaciones		92
Referencias bibliográficas		93

TABLA DE CONTENIDOS

	Páginas
ABSTRACT	20
Capítulo 1	25
1.	Marco teórico
.....	25
1.1. Antecedentes de la investigación	25
1.2. Bases teóricas	27
1.2.1. Cambio climático.	27
1.2.1.1. <i>Cambios observados en el sistema climático.</i>	28
1.2.2. América latina en el contexto global del cambio climático.	28
1.2.2.1. <i>Impactos económicos del cambio climático en la agricultura de América Latina.</i>	30
1.2.2.2. <i>Impactos del cambio climático en la agricultura de América Latina.</i>	32
1.2.2.3. <i>Impactos del fenómeno ENOS sobre la agricultura</i>	34
1.2.2.4. <i>Adaptación de América Latina al cambio climático.</i>	35
1.2.2.5. <i>Medidas de mitigación al cambio climático de América Latina.</i>	35
1.2.3. Ecuador en el contexto de cambio climático.	36
1.2.3.1. <i>Vulnerabilidad de Ecuador a cambios climáticos.</i>	37
1.2.3.2. <i>Sector agropecuario en Ecuador.</i>	38
1.2.3.3. <i>Andes Ecuatorianos.</i>	40
1.2.4. Provincia de Chimborazo y Cantón Riobamba en contexto del cambio climático.	41
1.2.4.1. <i>Clasificación de los cultivos relevantes en la provincia de Chimborazo.</i>	42
1.2.4.2. <i>Caracterización del cultivo de papa.</i>	43
1.2.4.3. <i>Datos climáticos de la provincia de Chimborazo.</i>	44
Capítulo 2	45
2.	Metodología
.....	45
2.1. Universo de estudio	45
2.2. Elección de la estación meteorológica para el análisis de datos	46
2.3. Metodología para el análisis del rendimiento productivo del cultivo de papa	47

2.4. Metodología para el análisis de las series temporales de las variables meteorológicas	47
2.5. Metodología para el análisis de las propiedades químicas del suelo	48
2.6. Correlación de las series temporales de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo del cultivo de papa	49
2.7. Determinación del porcentaje de influencia de cada variable meteorológica	51
2.8. Proyecciones de escenarios climáticos futuros.....	52
Capítulo 3.....	55
3.....	Resultados
.....	55
3.1. Elección de la estación meteorológica para el análisis de datos.....	55
3.2. Análisis del rendimiento productivo del cultivo de papa.....	56
3.3. Análisis de las series temporales de las variables meteorológicas.....	59
3.5. Correlación de las series temporales de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo del cultivo de papa	64
3.6. Determinación del porcentaje de influencia de cada variable meteorológica	70
3.7. Proyecciones de escenarios climáticos futuros.....	77
3.8 Comparativa de la evolución del rendimiento del cultivo entre la proyección ARIMA hasta el 2020 y la ecuación de regresión múltiple obtenida aplicando correlación múltiple.	90
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1. Escenarios Sres (Special Report On Emission Scenarios) 2090-2099.	25
Tabla 1-2. Resumen Del Total De Emisiones Y Absorciones De Gei En Ecuador 2010.	36
Tabla 1-3. Porcentaje Provincial De Erosión Activa Y Muy Activa En Los Andes Ecuatorianos.	40
Tabla 1-4. Índice De Vulnerabilidad Al Cambio Climático Escenario A2 Año 2020.	41
Tabla 1-5. Índice De Vulnerabilidad Al Cambio Climático Escenario B2 Año 2020.	42
Tabla 1-6. Variación Porcentual De La Precipitación En La Región Sierra Del Ecuador Respecto Al Año Base.	44
Tabla 2-1. Coordenada Utm Wgs 84 Zona 17s Del Cantón Riobamba.	45
Tabla 2-2. Límites Del Cantón Riobamba.	45
Tabla 2-3. Ubicación De La Estación Meteorológica Riobamba En Coordenadas Utm Wgs 84.	46
Tabla 3-1. Pruebas Estadísticas De Correlación Entre Las Estaciones De Riobamba Y Ambato.	55
Tabla 3-2. Pruebas Estadísticas De Correlación Entre Las Estaciones De Riobamba Y Guaslán.	56
Tabla 3-3. Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	57
Tabla 3-4. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa Y El Índice Del Niño Oceánico (Ino)	59
Tabla 3-5. Promedio Anual Para El Periodo 2002-2016 De Las Variables Meteorológicas En Estudio.	60
Tabla 3-6. Valores De Las Variables Meteorológicas En Estudio Y Del Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	64
Tabla 3-7. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Temperatura Máximo Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	65
Tabla 3-8. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Temperatura Mínima Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	65
Tabla 3-9. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Temperatura Media Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	66

Tabla 3-10. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Humedad Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.....	66
Tabla 3-11. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Precipitación Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.....	67
Tabla 3-12. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Radiación Solar Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	67
Tabla 3-13. Resultados De Las Pruebas Estadísticas De Correlación Entre La Variable Meteorológica Evapotranspiración Y El Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba.	68
Tabla 3-14. Índice De Correlación De Las Variables Meteorológicas Con El Rendimiento Productivo.....	68
Tabla 3-15. Resumen De Estadísticos Descriptivos De La Matriz De Correlaciones Múltiples.	69
Tabla 3-16. Estadísticos Descriptivos Del Análisis Acp.	70
Tabla 3-17. Matriz De Correlaciones (Pearson (N)) Del Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa Y Las Variables Meteorológicas En Estudio.	70
Tabla 3-18. Regresión Lineal Del Rendimiento En Función De Cantidad De Variables.....	71
Tabla 3-19. Valores Propios Del Análisis De Componentes Principales.	73
Tabla 3-20. Resultados Del Análisis De Componentes Principales.	73
Tabla 3-21. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Temperatura Máxima.....	79
Tabla 3-22. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Temperatura Mínima.	81
Tabla 3-23. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Temperatura Media.....	82
Tabla 3-24. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Humedad.....	84
Tabla 3-25. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Precipitación.	85
Tabla 3-26. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Radiación Solar.....	87
Tabla 3-27. Prueba Estacional De Mann-Kendall Para La Variable Evapotranspiración.	88
Tabla 3-28. Valores De Las Variables Meteorológicas En Estudio Para El Periodo 2002-2016 Y Proyecciones Anuales 2016-2020 En El Cantón Riobamba.....	89
Tabla 3-29. Valores De Rendimiento Obtenidos A Partir De La Ecuación De Regresión Múltiple.	90
Tabla 3-30. Comparativa Entre Los Valores De Rendimiento Para Arima Y Ecuación De Regresión.	90

Tabla 3-31. Rendimiento Obtenido A Partir De La Nueva Ecuación De Regresión Múltiple Ajustada.	91
Tabla 3-32. Comparativa Entre Los Valores De Rendimiento Para Arima Y Ecuación De Regresión.	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 0-1. Rendimiento Del Cultivo De Papa (2013) En Los Países Andinos. (T/Ha).....	21
Figura 1-1. Trayectorias De Emisiones De Gei 2000-2100.....	26
Figura 1-2. Emisiones Antropogénicas Totales De Gei Para El Período 1970-2010.	28
Figura 1-3. Emisiones Totales De Gei Alrededor Del Mundo.....	29
Figura 1-4. Riesgos Asociados A Los Motivos De Preocupación A Nivel Global A Niveles Crecientes.....	30
Figura 1-5. Frecuencia De Fenómenos Hidrometeorológicos 1970-2007 En América Latina....	31
Figura 1-6. Contribución De La Agricultura Al Pib En América Latina Y El Caribe.....	31
Figura 1-7. Cambios Proyectados En Los Rendimientos De Los Cultivos Debido Al Cambio..	32
Figura 1-8. Cambio En La Temperatura Y Precipitación Media En Base De Proyecciones De La	33
Figura 1-9. Condiciones Del Pacífico Tropical Durante El Niño.	35
Figura1-10. Daños Causados Por Enos (1998) En La Región Andina.	37
Figura1-11. Principales Afectaciones De La Producción Agropecuaria En El Ecuador.	38
Figura1-12. Superficie De Labor Agropecuaria En El Ecuador.	39
Figura1-13. Sensibilidad De Cultivos De Ante La Variabilidad Climática.	44
Figura 2-1. Límites Geográficos Del Cantón Riobamba.	45
Figura2-2. Estación Meteorológica Espoch-Inamhi.	46
Figura 2-3. Ejemplos De Distintos Tipos De Correlación.	50
Figura 3-1. A) Rendimiento Productivo Del Cultivo De Papa Y B) Tasa De Crecimiento Del Rendimiento.....	57
Figura 3-2. Rendimiento Del Cultivo De Papa En El Cantón Riobamba En Relación Al Índice Del Niño.....	58
Figura 3-3. (A) Evolución De La Temperatura Máxima, (B) Temperatura Mínima En El Cantón Riobamba, (C) Temperatura Media, (D) Humedad, (E) Precipitación, (F) La Radiación Solar Y (G) Evapotranspiración.	62
Figura 3-4. Correlación Entre La Temperatura Máxima Y El Rendimiento.	65
Figura 3-5. Correlación Entre La Temperatura Mínima Y El Rendimiento.	65
Figura 3-6. Correlación Entre La Temperatura Media Y El Rendimiento.	66
Figura 3-7. Correlación Entre La Humedad Y El Rendimiento.....	66
Figura 3-8. Correlación Entre La Precipitación Y El Rendimiento.	67
Figura 3-9. Correlación Entre La Radiación Solar Y El Rendimiento.	67

Figura 3-10. Correlación Entre La Evapotranspiración Y El Rendimiento.....	68
Figura 3-11. Contribución De Las Variables Meteorológicas Con Coeficientes Estandarizados Al	72
Figura 3-12. Gráfico De Sedimentación De Componentes Principales.....	73
Figura 3-13. Gráfico De Componentes Principales.	74
Figura 3-14. Evolución Temporal De La Componente F1.	75
Figura 3-15. Evolución Temporal De La Componente F2.	76
Figura 3-16. Observaciones Activas De La Serie Temporal 2002-2016.....	76
Figura 3-17. Biplot Del Rendimiento Del Cultivo Con Las Variables Meteorológicas En Estudio.	77
Figura 3-18. Proyección De La Temperatura Máxima Para El Año 2050.....	78
Figura 3-19. Proyección De La Temperatura Máxima Para El Año 2020.....	78
Figura 3-20. Evolución De La Temperatura Máxima Periodo 2002-2020.....	79
Figura 3-21. Evolución De La Temperatura Mínima Periodo 2002-2020.....	80
Figura 3-22. Proyección De La Temperatura Mínima Para El Año 2050.	80
Figura 3-23. Proyección De La Temperatura Mínima Para El Año 2020.	80
Figura 3-24. Proyección De La Temperatura Media Para El Año 2050.....	81
Figura 3-25. Proyección De La Temperatura Media Para El Año 2020.....	81
Figura 3-26. Evolución De La Temperatura Media Periodo 2002-2020.	82
Figura 3-27. Proyección De La Humedad Relativa Para El Año 2050.	83
Figura 3-28. Proyección De La Humedad Relativa Para El Año 2020.	83
Figura 3-29. Evolución De La Humedad Relativa Periodo 2002-2020.....	83
Figura 3-30. Proyección De La Precipitación Para El Año 2050.	84
Figura 3-31. Proyección De La Precipitación Para El Año 2020.	84
Figura 3-32. Evolución De La Precipitación Periodo 2002-2020.....	85
Figura 3-33. Proyección De La Precipitación Para El Año 2050.	86
Figura 3-34. Proyección De La Radiación Solar Para El Año 2020.....	86
Figura 3-35. Evolución De La Radiación Solar Periodo 2002-2020.....	86
Figura 3-36. Proyección De La Evapotranspiración Para El Año 2020.	87
Figura 3-37. Proyección De La Evapotranspiración Para El Año 2050.	88
Figura 3-38. Evolución De La Evapotranspiración Periodo 2002-2020.....	88
Figura 3-39. Rendimiento Arima Y Ecuaciones De Regresión Múltiple.	92
Figura 3-40. Proyección Para La Evolución De Las Componentes (A) F1 Y (B) F2.	92

LISTA DE ABREVIACIONES

°C: Grados Celsius

ACP: Análisis de componentes principales

AF: Agricultura familiar

AIDA: Asociación Interamericana para la Defensa del Medio Ambiente

ARIMA: Modelo estadístico auto regresivo integrado de media móvil

BAU: Bussines-as-usual

BCE: Banco central del Ecuador

BID: Banco Interamericano de desarrollo

BM: Banco mundial

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CH₄: Metano

C_{ho}: Constante anual del método Holdridge

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

CO₂: Dióxido de Carbono

CO_{2-eq}: Dióxido de carbono equivalente

COP: Conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

DNACC: Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático

DNMCC: Dirección Nacional de Mitigación al Cambio Climático

ENOS: El Niño-Oscilación del Sur

ESPAC: Encuesta de superficie y producción agropecuaria continúa

ESPOCH: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

E_{to}: Evapotranspiración potencial

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GADMR: Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad Riobamba

GADPCH: Gobierno Autónomo de la Provincia de Chimborazo

GEI: Gases de efecto invernadero

Gg: Gigagramos

Has: Hectáreas

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

INEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador

INO: Índice del Niño Oceánico

INPE: Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil
IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
K: Potasio
Km: Kilómetros
Km²: Kilómetros cuadrados
Kt: Constante del método Hargreaves para cálculo de evapotranspiración
M.s.n.m: Metros sobre el nivel del mar
m: metros
MAE: Ministerio de Ambiente del Ecuador
MAGAP: Ministerio de Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador
mm: milímetros
N: Nitrógeno
N₂O: Óxido nitroso
NBI: Necesidades básicas insatisfechas
OMM: Organización Meteorológica Mundial
ONU: Organización de las Naciones Unidas
P: Fósforo
p: Significancia
pH: Potencial de hidrogeno
PIB: Producto interno bruto
PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
R.E: Renewable energy
r: Coeficiente de correlación de Pearson
R²: Coeficiente de determinación
RCP: Trayectorias de concentración representativas
Ro= Radiación extraterrestre
Rs= Radiación incidente
S: Azufre
SCC: Subsecretaria de Cambio Climático
SENPLADES: Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador
SIPA: Sistema de información pública agropecuaria del Ecuador
SRES: Escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones
t: Prueba estadística t-student
Tm: Toneladas métricas

TP: Temperatura media del aire

UPA: Unidades de producción agropecuaria

USCUSS: Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura

UTM: Universal Transversal Mercator

WGS: World Geodetic System

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en el cultivo de papa en el cantón Riobamba, Ecuador, ya que posee un alto índice de vulnerabilidad a la variabilidad climática. Para ello, se analizaron los comportamientos de las variables climáticas involucradas en el rendimiento y su futura evolución temporal. Se consideraron las variables temperatura (media, mínima y máxima), humedad, radiación solar, precipitaciones y evapotranspiración del suelo. De los datos analizados para el período 2000-2016 y obtenidos a partir de la estación meteorológica ubicada en Riobamba, se analizaron las series temporales y su posible correlación con el rendimiento del cultivo, así como su interdependencia. Las proyecciones a futuro de esas variables así como del rendimiento, se evaluaron a partir del programa ARIMA, hasta el año 2050 inclusive. Finalmente se utilizó análisis de componentes principales para corroborar la tendencia obtenida en los puntos anteriores. De los resultados obtenidos, se puede observar que las variables climáticas en general tienen una tendencia creciente, a excepción de la precipitación, mientras que la radiación solar y la evapotranspiración podrían considerarse estables o con tendencia a decrecer. De esta manera se pudo concluir que a pesar de la variabilidad climática pronosticada para el cantón Riobamba el rendimiento de cultivo de papa seguirá en aumento.

Palabras Clave:

<Cambio climático, cultivo de papa, variabilidad climática, análisis de componentes principales, proyección de escenarios climáticos futuros>

ABSTRACT

The aim of the present study was to evaluate the impact of climate change on potato cultivation in the canton of Riobamba, Ecuador, since it has a high vulnerability index to climatic variability. For this purpose, the behavior of the climate system variables involved in the crop yield and its temporal evolution were analyzed. The variables temperature (mean, minimum and maximum), humidity, solar radiation, rainfall and soil evapotranspiration were considered. The data analyzed for the period 2000-2016, obtained from the meteorological station located in Riobamba, and their possible correlation with crop yield, as well as their interdependence, were analyzed. The future projections of these variables as well as the performance, were evaluated from the ARIMA program, up to the year 2050 inclusive. Finally, principal component analysis was used to validate the trend obtained in the previous points. From the results obtained, it can be observed that climatic variables in general have an increasing trend, with the exception of precipitation, while solar radiation and evapotranspiration could be considered stable or with a tendency to decrease. In this way it was possible to conclude that despite the predicted climatic variability for the Riobamba canton, potato crop yield will continue to increase.

Key Words:

<Climate change, potato cultivation, climatic variability, principal component analysis, projection of future climate scenarios>

INTRODUCCIÓN AL TEMA DE TESIS

Situación Problemática

El cambio climático altera la dinámica de la atmósfera e impacta en la variabilidad del clima, por lo tanto debe ser entendido no sólo como un fenómeno concerniente a la atmósfera sino como uno que afecta también directamente a la vida en el planeta, influyendo en todos los aspectos vinculados con el desarrollo social, económico, ambiental y cultural a una escala global y local. Según un reciente estudio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el mundo necesitará producir casi tres veces más de víveres para alimentar los 9.600 millones de personas que tendrá en el año 2050 el planeta tierra. Una buena parte de esa población vulnerable estaría ubicada en América Latina.

En los Andes rurales, la papa es una de las principales fuentes de alimentación e ingresos y su alto rendimiento energético la convierte en un alimento esencial para aquellas regiones donde existen escasas alternativas productivas. La producción de papa por hectárea es aún baja en algunos países de la región (ver gráfico 0-1). Sin embargo, mantener esos valores en las condiciones de un clima cambiante como el actual será un verdadero desafío para los agricultores en los años venideros.

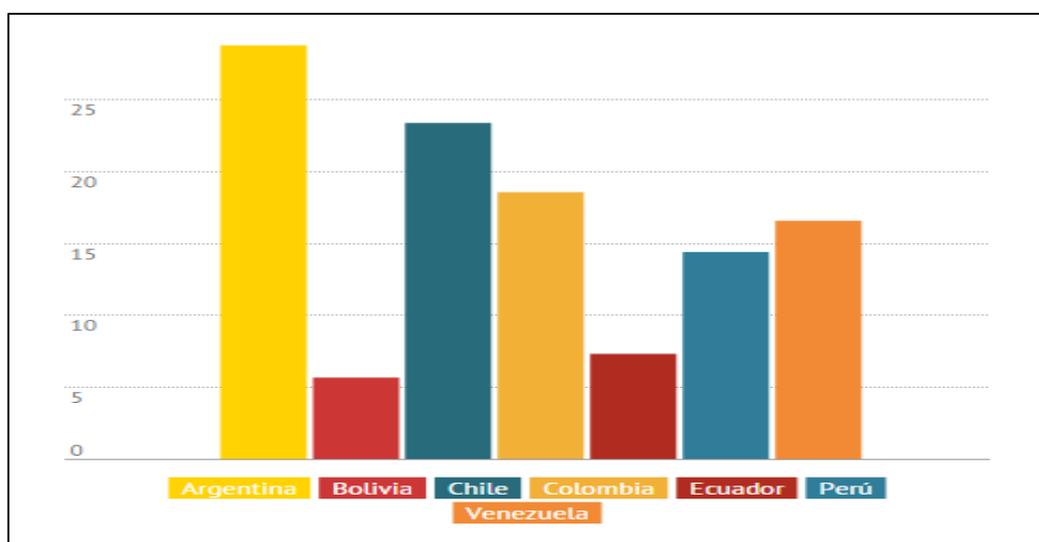


Figura 0-1. Rendimiento del cultivo de papa (2013) en los países andinos. (T/Ha)
Fuente: (FAOSTAT, 2013).

Es necesario, por lo tanto, que agricultores e investigadores, así como tomadores de decisión conozcan los efectos que causa el cambio climático sobre la producción (rendimiento productivo) del cultivo de papa y las estrategias disponibles en la actualidad en América Latina y el resto del mundo para disminuirlo.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Formulación del Problema

Los agricultores dedicados al cultivo de papa en el cantón Riobamba, por norma general desconocen los efectos del cambio climático global. Debido a este hecho, cabe esperar que la evolución del rendimiento productivo del cultivo a causa del cambio climático local también sea desconocida, disminuyendo de esta forma su capacidad de resiliencia.

Justificación

El cambio climático actualmente es percibido como un problema de interés para los científicos que lo estudian, los líderes políticos mundiales y el público en general. Estos sectores a su vez han demostrado creciente preocupación por las condiciones climáticas futuras que podría presentar el planeta a causa de este fenómeno; por ende el estudiar sus efectos e impactos localmente se vuelve imprescindible ya que permitirá comprender de mejor manera cómo influirá a escala global en la vida del ser humano.

En este último sentido cobra importancia el efecto que este cambio pueda tener en la llamada seguridad alimentaria, entendiendo a ésta como la disponibilidad de alimentos, la accesibilidad de las personas a ellos, producción y rendimiento. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2014) estima con un nivel de confianza alto que todos los aspectos que involucran a la seguridad alimentaria como son la producción y consumo de alimentos, y el acceso a éstos, ya están potencialmente afectados por el cambio climático.

El sector agropecuario en Ecuador no está exento de las amenazas climatológicas. Durante el período 1997-1998, el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) causó cuantiosos daños cercanos al 50% de la producción y equivalentes a USD. 2.200 millones. Posteriormente entre el año 2011-2012 otro evento ENOS causó considerables pérdidas en cultivos agrícolas dejando en evidencia la vulnerabilidad del sector agrícola del país a cambios en el clima (Banco Interamericano de desarrollo (BID), 2012; Banco mundial (BM) 2016; Banco central del Ecuador (BCE), 2014).

Estudios realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil (INPE, 2010) sobre precipitación y temperatura utilizando el modelo PRECIS para el periodo 1966 – 1999 evidencian un incremento en la temperatura media del país de aproximadamente 1,23°C. El modelo además prevé un incremento de hasta 4,43°C en el territorio nacional, siendo la provincia de Chimborazo la más afectada con un incremento pronosticado de hasta el 4,06% para el 2100 y una disminución en el porcentaje de precipitación de hasta el 7,3%.

A partir del análisis de niveles de pobreza (NBI), incidencia étnica, índice de erosión, índice de variación de temperatura, y el índice de variación de precipitación, Jiménez et al., (2012) investigaron el índice de vulnerabilidad al cambio climático en el Ecuador. Los valores del índice se estimaron para los escenarios probables A2 y B2 del IPCC para el 2020. Se llegó a concluir que la provincia de Chimborazo es la más vulnerable siendo 7 de sus 10 cantones vulnerables para el escenario B2 y 3 cantones en el escenario A2 (Tabla 1-4, Tabla 1-5).

Por lo anteriormente expuesto y dada la importancia económica del sector agrícola en el país, es necesario elaborar un análisis sobre los posibles efectos positivos o negativos del cambio climático en el rendimiento de su producción agrícola, partiendo del estudio de las variables climáticas implicadas en estos cambios. En este sentido, el presente plan propone estudiar estos lineamientos, en el cultivo de papa en el cantón Riobamba, dado su nivel de vulnerabilidad antes mencionado.

Este estudio beneficiará a los agricultores, empresas o instituciones relacionadas con el sector agrícola, que quieran conocer el estado actual del cultivo de papa en el cantón Riobamba frente a los impactos que causa o podría causar el cambio climático en un futuro. Este estudio podría trasladarse a las diferentes provincias Andinas del Ecuador.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Evaluar los efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las series temporales de temperatura, humedad, precipitación, evapotranspiración y radiación solar en el cantón Riobamba.
- Correlacionar las variables climáticas con el rendimiento productivo del cultivo.
- Determinar la influencia de cada una de las variables meteorológicas sobre el rendimiento productivo del cultivo.
- Proyectar posibles escenarios climáticos futuros sobre las variables meteorológicas en estudio.

Capítulo 1

1. Marco teórico

1.1. Antecedentes de la investigación

El IPCC elaboró una serie de escenarios climáticos que son representaciones matemáticas de procesos del sistema climático de la Tierra conocidos como Special Report on Emission Scenarios (SRES. Tabla 1-1) por sus siglas en inglés. Estos escenarios buscan predecir los efectos del cambio climático a futuro por la combinación de una serie de características como son el crecimiento demográfico y económico, el uso de energías alternativas y combustibles fósiles (IPCC, 2007).

Tabla 1-1. Escenarios SRES (Special Report on Emission Scenarios) 2090-2099.

Escenario	Principales Características	Estimación aumento de temperatura (°C)	Estimación aumento del nivel del mar
A1	Rápido crecimiento demográfico y económico asociado a la incorporación de tecnologías más eficientes.	0,6	18,9
A1F1	Uso intensivo de combustibles de origen fósil	4,0	36,4
A1T	Uso predominante de fuentes de energía de origen no fósil.	2,4	32,5
A1B	Uso equilibrado de todo tipo de fuentes de energía.	2,8	29,5
B1	Cierta reducción del nivel de emisiones mediante el uso más eficiente de energía y de tecnologías más desarrolladas.	1,8	25,0
B2	Cierta reducción del nivel de emisiones mediante el uso más eficiente de energía y de soluciones más localizadas.	2,4	32,5

Fuente: (IPCC, 2007).

En el quinto informe de evaluación del IPCC (2014), se proponen proyecciones que están basadas en trayectorias de concentración representativas (RCP), describen 4 trayectorias distintas en el siglo XXI, éstas son de emisiones y concentraciones atmosféricas, de GEI, contaminantes atmosféricos y el uso de suelo.

Estas trayectorias (Figura 1-1) son conocidas como multimodelos e incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP 2,6), dos escenarios intermedios (RCP 4,5 y RCP 6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8,5) y se ajustan a los escenarios planteados en el cuarto informe de evaluación con varias mejoras para las predicciones actuales (IPCC, 2014).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

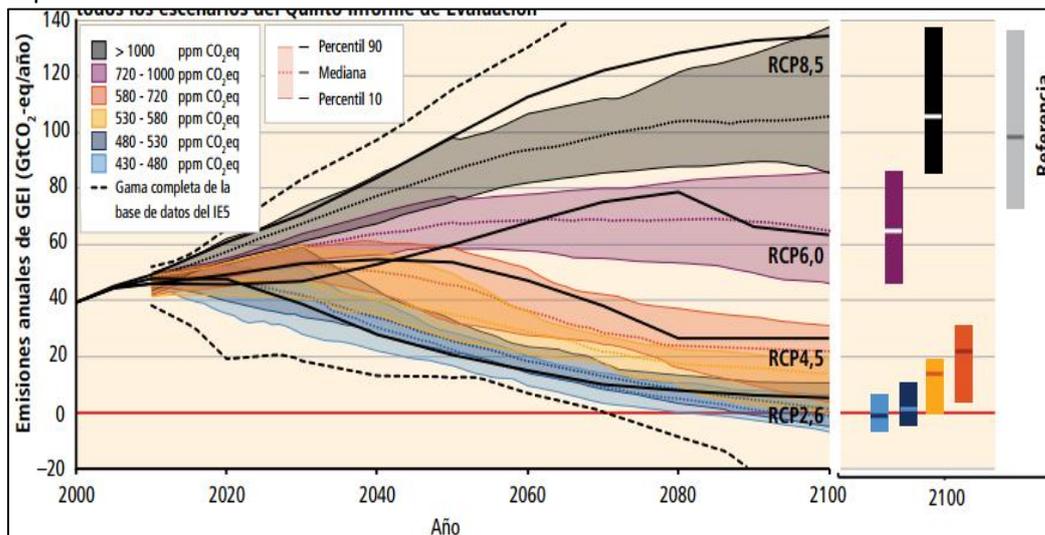


Figura 1-1. Trayectorias de emisiones de GEI 2000-2100.
Fuente: IPCC (2014).

Walsh et al. 2017 trabajó con tres modelos a futuro equivalentes a los del IPCC en los cuales se combinan diferentes grados de desarrollo de las energías renovables. Estos modelos son “business-as-usual” (BAU) equivalente al escenario A1T, “renewable energy” (RE)-low equivalente a B1 y RE-high equivalente a A1 (Ver Tabla 1-1); estos escenarios se combinan con diferentes grados de desarrollo de las energías renovables, tecnologías de absorción de CO₂ y uso de combustibles fósiles. El trabajo logró determinar que aunque se llegase a implementar el mejor de los escenarios descritos a nivel mundial, las predicciones para este conjunto de nuevos modelos matemáticos indican que la temperatura para el 2100 será 2,5-2,6 °C superior a la era preindustrial, lejos de los objetivos planteados en la COP21. Este hecho implica una seria advertencia a los países más vulnerables al cambio climático y a los países responsables del mismo.

En América Latina, Zapata et al., (2011) evaluó los impactos del cambio climático en la región usando modelos SRES (IPCC, 2007) y de nicho ecológico para el año 2050 sobre 25 cultivos de los Andes tropicales. El trabajo concluyó que los efectos negativos del cambio climático son ligeramente más altos que los efectos positivos, y que el porcentaje de área de cultivos que se verán potencialmente afectados serán: 83,2% frejol, 64% papa, 79,3% tomate y 74,3% trigo.

En un estudio realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil (INPE por sus siglas en portugués, 2010) utilizando el modelo PRECIS ECHAM para el periodo 1966 – 1999 se evidencia una leve creciente en la temperatura media del país (1,23°C). El modelo prevé según el escenario de emisión A2 del IPCC (IPCC, 2007) un incremento de hasta 4,43°C siendo la provincia de Chimborazo la más afectada con una predicción de incremento de (4,06%) para el 2100 (Jiménez, et al., 2012).

Por otra parte el mismo estudio realizado por el INPE (INPE, 2010) con el modelo PRECIS ECHAM escenario A2 revela que los niveles de pluviosidad en el Ecuador para el año 2050 se incrementara hasta en un 14,5%; sin embargo esta variación de pluviosidad no responde a la misma distribución en las diferentes regiones del país. En la región interandina se evidenciará una disminución en el porcentaje de precipitación siendo nuevamente la provincia de Chimborazo la más afectada con una disminución de la precipitación de (-7,3%).

En Ecuador en un estudio realizado por Ramos (2016) se modelizó estadísticamente la variabilidad climática para determinar los efectos del cambio climático en entornos agropecuarios en el cantón San Miguel de los Bancos y como resultado se obtuvo que en el lugar existe un 53% de pérdida del entorno natural y un aumento del 31% del área agropecuaria y se concluyó que la mayor parte de las áreas naturales conservadas en el futuro serán áreas fragmentadas

1.2.Bases teóricas

1.2.1. Cambio climático.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), define cambio climático como “el cambio de clima atribuible 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 periodos de tiempo comparables” (IPCC, 2007).

El cambio climático puede ser percibido como un fenómeno que afecta a la vida sobre nuestro planeta en su totalidad y por lo tanto, el mayor reto que en la actualidad se enfrenta el ser humano es combatir y adaptarse a la variabilidad climática, mientras que para el resto de vida silvestre y animal la única opción es la adaptación (Feo, et al., 2009).

Tras realizarse la primera conferencia mundial del clima en Ginebra 1979, la comunidad mundial se vio alertada por los peligros en el cambio del clima, tras este llamado. En el año 1988 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crean el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático, por sus siglas en inglés (IPCC).

En el informe de síntesis del quinto reporte de evaluación el IPCC (2014) se afirma con 95% de certeza que la influencia del ser humano en el cambio climático es cierta, y que sus actividades son los principales causantes del mismo y sigue en aumento (Figura 1-2).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

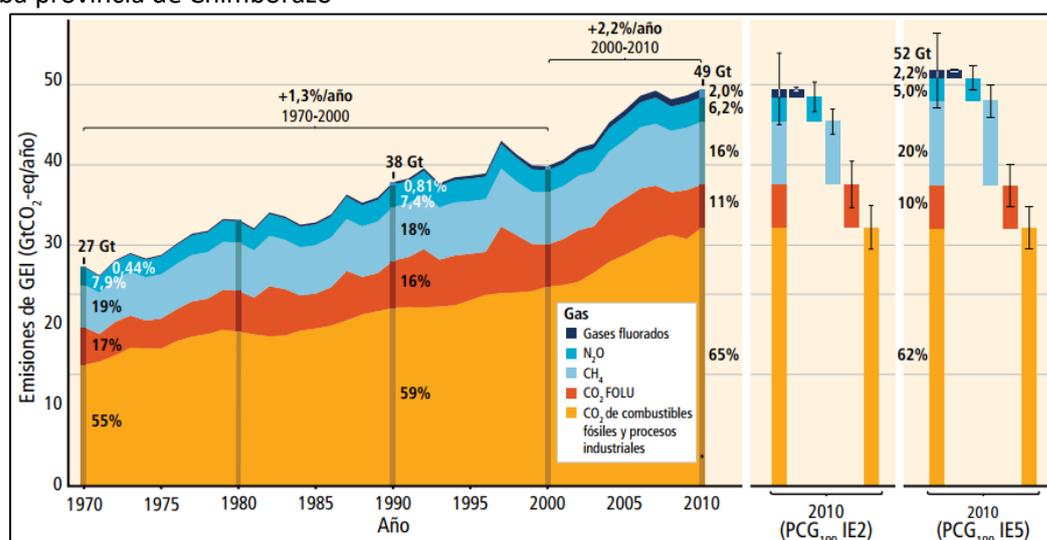


Figura 1-2. Emisiones antropogénicas totales de GEI para el período 1970-2010.
Fuente: (IPCC, 2014).

1.2.1.1. Cambios observados en el sistema climático.

El calentamiento y la variabilidad en el sistema climático es una certeza, los cambios son observables y medibles, los océanos se han acidificado y calentado, la temperatura en las zonas continentales sigue en aumento, el permafrost se calienta, el hielo se derrite y los nevados retroceden, el nivel del mar se ha incrementado y la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera actual es la más alta registra (IPCC, 2014).

Los cambios sucedidos en la atmósfera pueden resumirse en un aumento general de la temperatura de la tierra, alrededor de 0,85 °C (0,65 a 1,06) °C para el periodo 1880-2012. Si tomamos en cuenta el calentamiento sucedido desde el periodo 1850-1990 al periodo 2003-2012 la temperatura se ha incrementado en alrededor de 0,78°C (0,72 a 0,85) °C (IPCC, 2014).

A nivel planetario el océano se ha calentado a nivel superficial (75m), alrededor de 0,11 °C (0,09 a 0,13) °C por decenio en el periodo 1971 y 2010. Este calentamiento es el principal responsable de la energía almacenada en el planeta con un 90%; desde el inicio de la era industrial el pH de las aguas del océano disminuyó 0,1 por la absorción de CO₂, lo que corresponde a un aumento del 26% de la acidez (IPCC, 2014).

1.2.2. América latina en el contexto global del cambio climático.

América Latina es una de las regiones más vulnerables del planeta a pesar de que sus emisiones de GEI son reducidas; en comparación con los países del hemisferio norte sufrirá consecuencias desproporcionadas y mucho más severas debidas principalmente a que la región tiene dependencia

excesiva y persistente a los productos naturales y recursos naturales (Samaniego, 2009; BM, 2010; PNUMA, 2016).

En conjunto América Latina aporta en 8% a las emisiones de GEI, un dato que resulta bajo si lo ponemos en contexto de su población y área geográfica (Figura 1-3). La mayor parte de emisiones que provienen de la región provienen de la deforestación y la agricultura, al contrario del resto del mundo cuyas principales emisiones provienen de la generación de energía y el consumo de combustibles fósiles (Honty, 2007).

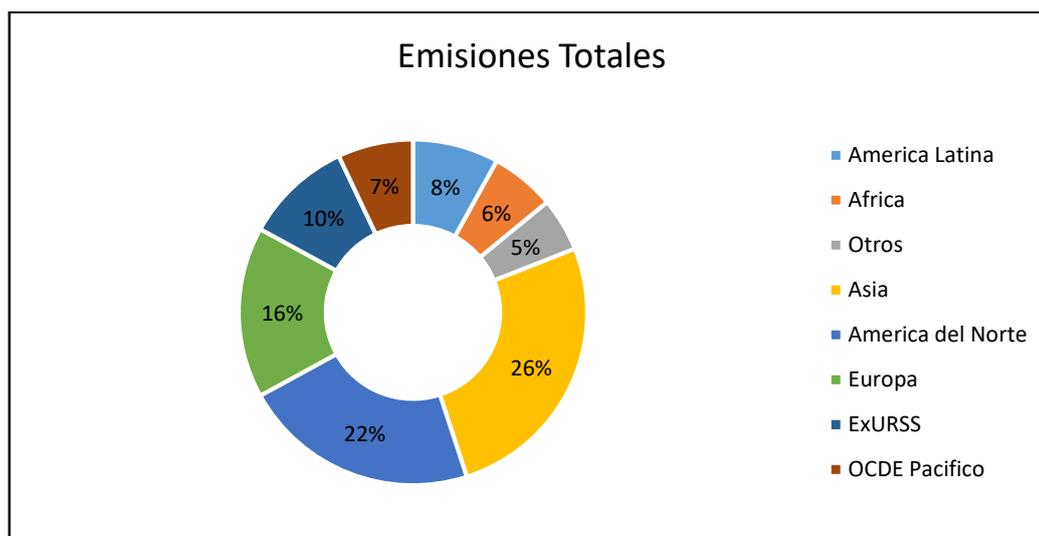


Figura 1-3. Emisiones totales de GEI alrededor del mundo.
Fuente: (Honty, 2007)

Samaniego (2009) nos indica que América Latina y el Caribe son un importante sumidero de carbono que debe ser preservado. Se estima que en ecosistemas boscosos tiene 16 y 18% del total mundial de carbono, 11% en pastizales y 17% en sistemas agrícolas; sin embargo estos recursos se ven sometidos a una constante degradación, la cubierta boscosa se ve reemplazada por la expansión agrícola, ganadera y urbana, la minería, y a la explotación de madera.

Existen cinco motivos que aumentan el riesgo al cambio climático y pone en jaque la capacidad de adaptación de las personas, la economía y los ecosistemas en las regiones más vulnerables de América Latina. Estos motivos de preocupación son: 1. Sistemas únicos y amenazados, 2. Episodios singulares a gran escala, 3. Impactos totales a nivel global, 4. Distribución de los impactos, y 5. Episodios meteorológicos extremos (Figura 1-4., IPCC, 2014).

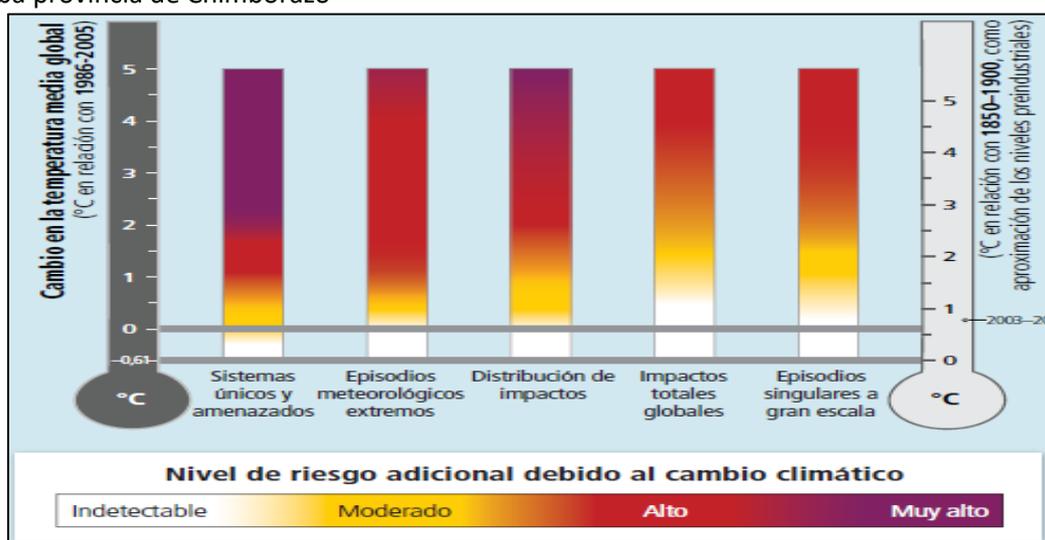


Figura 1-4. Riesgos asociados a los motivos de preocupación a nivel global a niveles crecientes de cambio climático.

Fuente: (IPCC, 2014).

1.2.2.1. Impactos económicos del cambio climático en la agricultura de América Latina.

Para determinar los impactos que tendrá el cambio climático sobre la agricultura en América Latina, es conveniente analizar primero la importancia que este factor tiene en la economía de la región; en los últimos años la contribución de la agricultura en la economía de la región se ha estabilizado entorno al 6,3% del producto interno bruto (PIB) (Samaniego, 2009).

En las últimas décadas América Latina ha evidenciado cambios en los patrones de precipitación, aumento de la temperatura, heladas, olas de calor, tormentas de granizo y cambios en el uso del suelo, como deforestación y ampliación de la frontera agrícola acelerando la erosión del mismo. Se espera que un aumento de temperatura a finales de siglo conlleve más problemas a la región (Conde y Saldaña, 2007; Ortiz, 2012).

Los impactos de estos fenómenos extremos relacionados con la variabilidad del clima pueden resumirse como la pérdida de ecosistemas, disminución en la producción de alimentos, abastecimiento de agua, daños en asentamientos humanos, morbilidad y mortalidad humanas; estos impactos son independientes del grado de desarrollo de un país y están relacionados con el grado de preparación que tengan los diversos sectores al cambio climático (Figura 1-5., IPCC, 2014).

América Latina por causas del cambio climático sufrirá de estrés hídrico en la región Andina debido a cambios en la dinámica de las nubes y retroceso de glaciares, afectando a la disponibilidad de agua y la generación de energía en las zonas que dependen de los sistemas montañosos; por otro lado, las zonas costeras se verán afectadas por el aumento del nivel mar causando un incremento de inundaciones (Ortiz, 2012; Feo, et al., 2009; Vergara, et al., 2007).

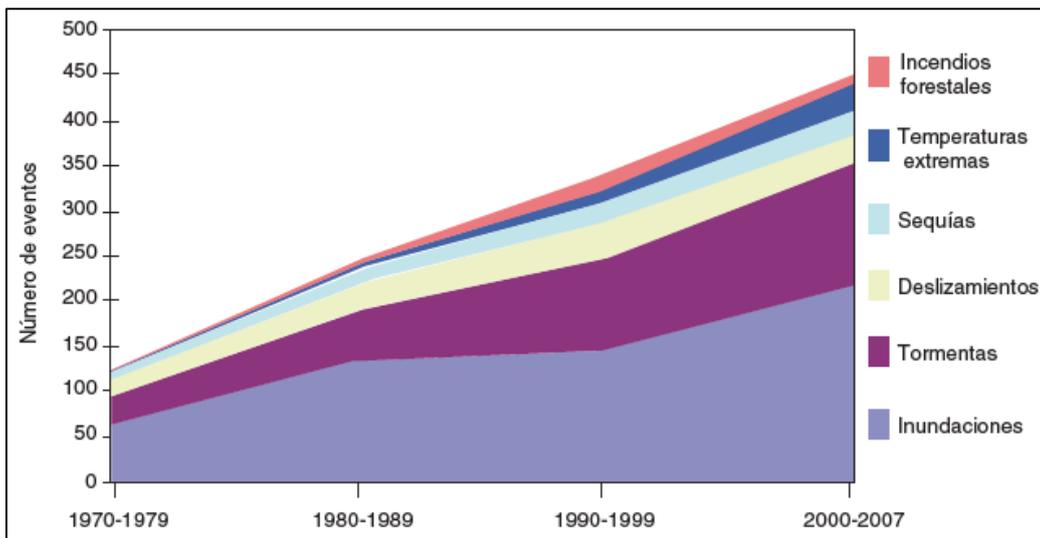


Figura 1-5. Frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos 1970-2007 en América Latina.
Fuente: (Samaniego 2009-CEPAL).

El sector agrícola de forma directa o indirecta continúa teniendo una gran importancia económica en América Latina a pesar de la disminución en su aporte al total de la economía (PIB), dado que aporta a la generación de empleo, produce alimentos, es fundamental para la conservación de bosques y la biodiversidad y más actualmente aporta a la seguridad energética debido a la producción de biocombustibles (Galindo et al., 2014).

Los países de América Latina y el Caribe pueden agruparse en 4 grupos o categorías de acuerdo a la relación entre el valor agregado agropecuario y al PIB de cada país (Figura 1-6). En el primer grupo el aporte al PIB varía de 34,1% a 17,2%, en el segundo grupo la variación de PIB es de 13,6% a 9,4%, el tercer grupo la variación de PIB es 13,5% a 6,9 y finalmente la variación de PIB del cuarto grupo es 6,4% a 0,7% (Samaniego, 2009).

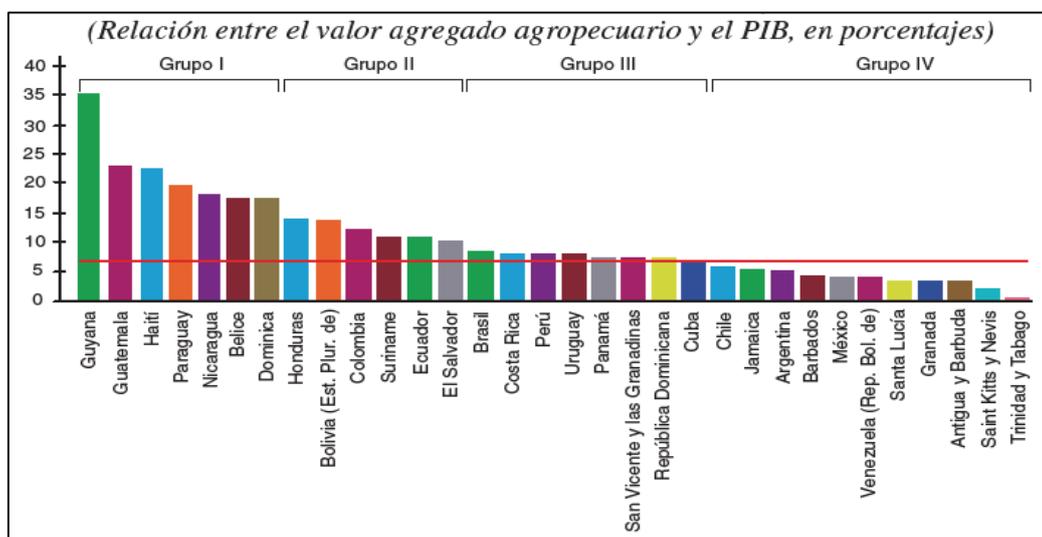


Figura 1-6. Contribución de la agricultura al PIB en América Latina y el Caribe.
Fuente: (Samaniego, 2009-CEPAL).

1.2.2.2. Impactos del cambio climático en la agricultura de América Latina.

Existe una gran preocupación entre los científicos que estudian el cambio climático ya que a pesar que los efectos del cambio climático sobre la producción agrícola son muy heterogéneos difiriendo entre una región y otra, se espera tener efectos de gran envergadura en países en vías de desarrollo que se encuentren principalmente en zonas tropicales y con poca capacidad de adaptación, particularmente América Latina y El Caribe (Cline, 2007).

El IPCC pronostica que a medida que la temperatura siga incrementándose, las precipitaciones cambiarán sus patrones generando impactos significativos en el rendimiento agrícola, que producirá pérdidas económicas, sociales y ambientales poniendo en peligro la seguridad alimentaria de áreas rurales de la región. Estos hechos ubican a la agricultura como uno de los sectores más sensibles al cambio climático (Altieri y Nichols, 2008; Honty, 2007; Conde y Saldaña, 2007).

EL Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2012) señala que otros efectos esperados por el cambio climático en América Latina son la disminución de la calidad de los cultivos, aumento del costo de los alimentos básicos entre un 30% y un 100%, mayor lixiviación del nitrógeno en el suelo, menor disponibilidad de tierras y aguas para su uso en la agricultura. Esto debe tender a generar la necesidad de adaptar los agroecosistemas de los pequeños productores a los cambios climáticos.

Existe además evidencia aportada por Centro de Estudios Para América Latina (Galindo et al., 2014) que sugiere que los efectos del cambio climático sobre la agricultura son no lineales (Figura 1-7) y dependen de un conjunto de factores como la disponibilidad de agua, la infraestructura para riego, las condiciones socioeconómicas de los agricultores y la zona geográfica.

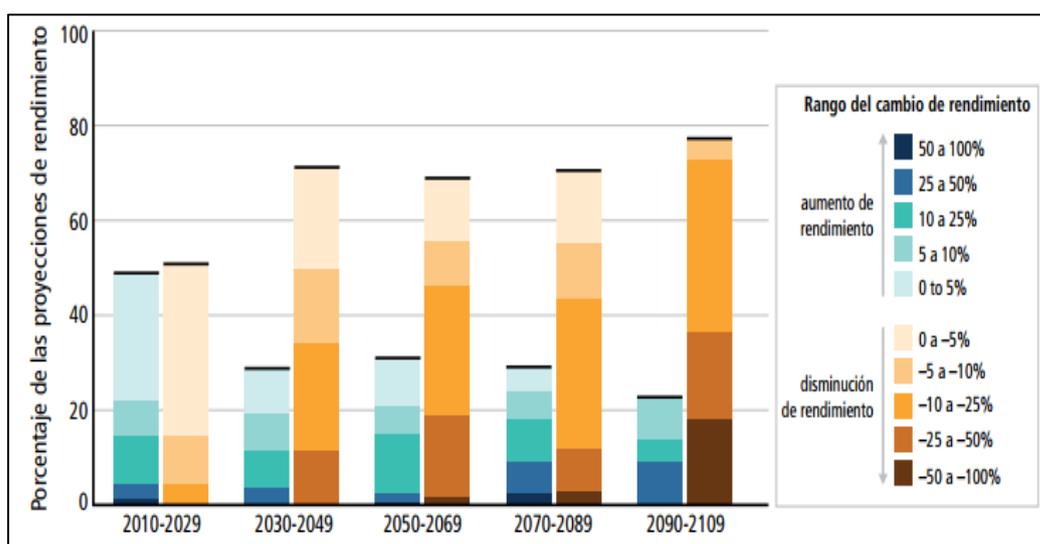


Figura 1-7. Cambios proyectados en los rendimientos de los cultivos debido al cambio climático para regiones tropicales.

Fuente: (IPCC, 2014).

Para determinar los efectos físicos que el cambio climático podría ocasionar en los cultivos de la región, en primer lugar cabe destacar que la agricultura no es un proceso biológico natural y que necesita de la intervención humana para el crecimiento de los cultivos; por este motivo es necesario conocer predicciones a futuro entre la interacción de los fenómenos físicos que causara el cambio climático y los actores humanos de la región (Maletta, 2009).

Los efectos físicos causados por el cambio climático en la temperatura o en las precipitaciones (Figura 1-8) modificarán la forma en que los agricultores locales perciben el clima, en función de esta percepción escogerán el cultivo que mejor se adapte, uso de mayor cantidad de productos agroquímicos, elección de fechas de siembra y tecnología o destinar a otro uso la tierra, pero lejos de ser esto una solución es una medida de adaptación momentánea (Maletta, 2009).

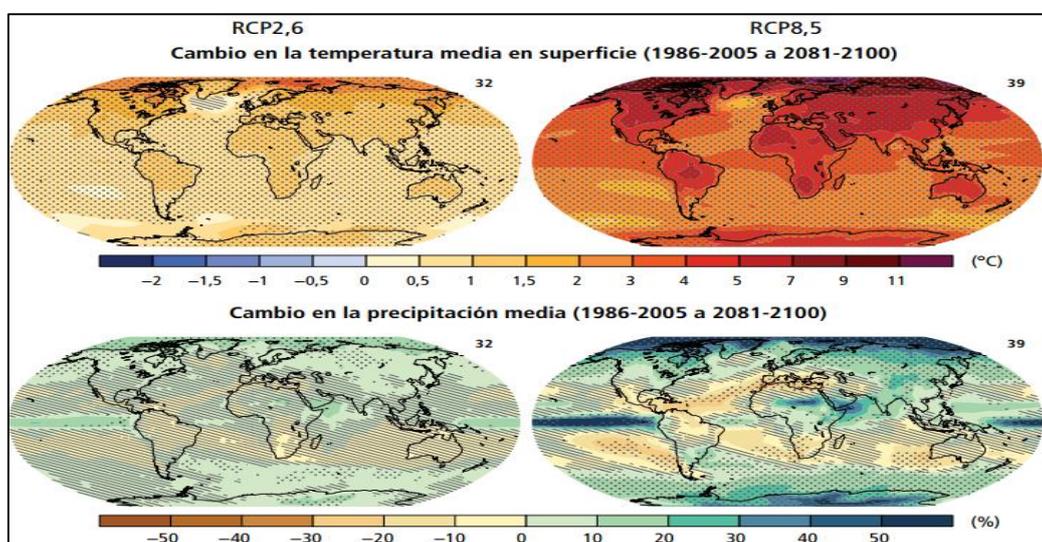


Figura 1-8. Cambio en la temperatura y precipitación media en base de proyecciones de la media de multimodelos 2081-2100.

Fuente: (IPCC, 2014).

Las comunidades rurales en América Latina son en extremo vulnerables a los cambios en patrones climáticos; se enfrentan a la emigración constante ya que la mayor parte de su economía depende de la agricultura sensible al clima, sea en tema de generación de empleo o subsistencia y en la salud de población si se ve afectada la calidad y cantidad de alimentos que producen (Ortiz, 2012; FAO, 2014).

Gran parte de la población rural en los Andes viven en situación de pobreza, en ambientes que en la actualidad ya son hostiles y dependen de regímenes de lluvia impredecibles. Este grupo de personas se volverá en extremo vulnerable al cambio climático por varios factores como son la situación geográfica en la que se encuentran, los bajos ingresos, carencia de otros medios para subsistir y escasas de agua por la pérdida de nevados y glaciares (AIDA, 2011; Altieri & Nicholls, 2008; Vargas, 2007; Allcamari & García, 2016).

1.2.2.3. Impactos del fenómeno ENOS sobre la agricultura

En América Latina una de las interacciones con mayor impacto es la que ocurre entre el océano-atmósfera y se desarrolla a escala interanual; tiene como nombre científico El Niño-Oscilación del sur (ENOS). El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), se presenta a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la temperatura superficial del mar (Maturana, et al., 2000; Conde y Saldaña, 2007).

Los fenómenos ENOS son la fuente principal de variabilidad climática en la región y han causado grandes pérdidas económicas y sociales a través de los años, afectando principalmente al sector agrícola por cambios en los patrones climáticos de precipitación y temperatura que conllevan a grandes inundaciones y sequías.

El Índice de Oscilación Sur (IOS) monitoreado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), es un indicador utilizado para advertir sobre la existencia e intensidad del fenómeno ENOS. El IOS fue definido como la diferencia de presión que existe entre Tahití en las Polinesias Francesas y Darwin en Australia, se correlaciona el aumento de presión en Darwin con la disminución de presión en Tahití y viceversa, efecto que explica el calentamiento y enfriamiento en las costas del océano pacífico. Según ese índice, el último fenómeno del Niño ocurrió en la temporada 2015/2016 fue catalogado como fuerte (Figura 1-9., Maturana, et al., 2000; Conde y Saldaña, 2007; Ortiz, 2012; NOAA, 2018).

En los países Andinos el fenómeno ENOS ha causado grandes impactos sobre el sector agrícola. Dicho impacto es expresado en forma diferencial sobre el territorio impactado; en el Ecuador los efectos advertidos en la costa son diferentes a los que se pueden apreciar en la Sierra en función de las condiciones climáticas y la vulnerabilidad específica agroecológica. La vulnerabilidad agroecológica está dictaminada por el tipo y condición de suelo, diferencias en los sistemas de producción y el ciclo de vida de los productos agrícolas (Rojas, 2011).

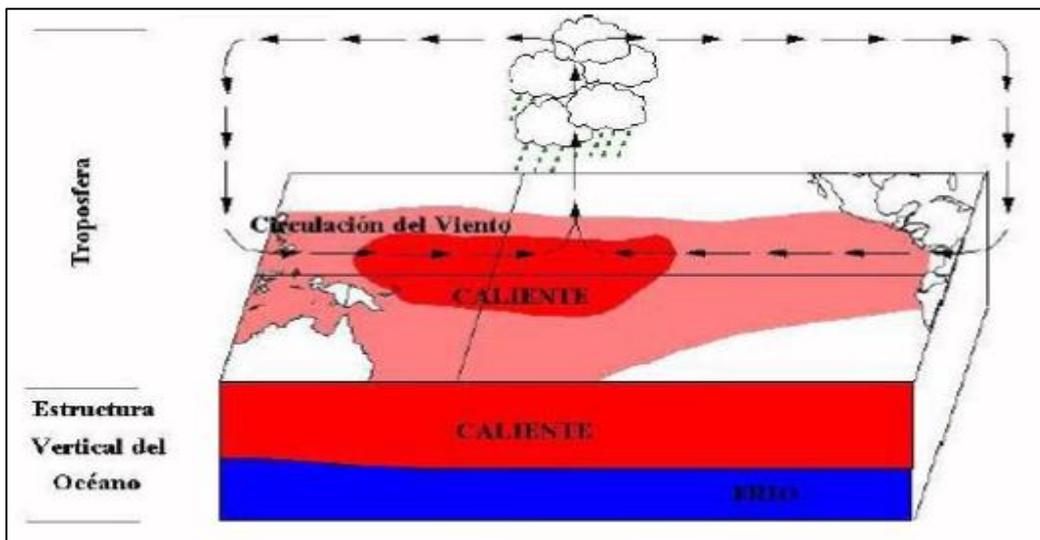


Figura 1-9. Condiciones del Pacífico tropical durante El Niño.
Fuente: (Conde y Saldaña, 2007).

1.2.2.4. Adaptación de América Latina al cambio climático.

La sociedad, los empresarios y el gobierno en América Latina siguen planificando su futuro sin tomar en cuenta las nuevas condiciones climáticas, y que la adaptación es específica por lo que se refiere a un único lugar y contexto; esto quiere decir que las medidas de adaptación que resultaran exitosas en un determinado país pueden no ser adecuada para otro (Honty, 2007).

La adaptación al cambio climático puede estar alineada al desarrollo sostenible y la reducción de la pobreza extrema e inequidad, además puede traer consigo varios beneficios como es el contribuir al bienestar de la población actual y futura, asegurar los activos y bienes económicos de la región, la protección de los ecosistemas en sus funciones (IPCC, 2014; PNUMA, 2016).

El desarrollo de la capacidad de adaptación en la región traerá consigo obstáculos, como la cuantificación de recursos necesarios y el riesgo de pérdidas productivas privadas que puedan ser trasladadas al gasto público. Bajo este contexto netamente económico la adaptación al cambio climático en la región buscará proteger las finanzas públicas y la estabilidad de la economía del sector privado (Samaniego, 2009).

1.2.2.5. Medidas de mitigación al cambio climático de América Latina.

La mitigación implica un cierto nivel de interacción entre beneficio y riesgo debido a los efectos colaterales adversos que ésta podría causar, sin embargo estos riesgos son minúsculos comparados con los impactos del cambio climático que pueden ser sustancialmente disminuidos por medidas adecuadas de mitigación a corto y largo plazo (IPCCC, 2014).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

El panorama internacional para América Latina es incierto y todo parece indicar que los esfuerzos económicos concertados de la comunidad internacional apuntan a una reforma en los mercados de carbono; de esta forma se reducirá la fuga de emisiones e intentará incentivar a los gobiernos de la región a adoptar políticas públicas referente a sus emisiones de GEI, eficiencia energética y reducción del consumo de combustibles fósiles (Samaniego., 2009; BM, 2010; IPCC, 2014).

En el sector agrícola no existen medidas de mitigación universales, aun así el IPCC recomienda tres mecanismos de mitigación. El primero de ellos consiste en reducir emisiones de ecosistemas agrícolas mediante un manejo más eficiente de los flujos de carbono y nitrógeno, el segundo en captar CO₂ en sistemas agroforestales, y finalmente desplazar el uso de combustibles fósiles por biomasa que pueda servir de combustible.

1.2.3. Ecuador en el contexto de cambio climático.

En el Ecuador el Ministerio de Ambiente (MAE) es el órgano rector en cambio climático a través de la Subsecretaría de Cambio Climático (SCC). La SCC está encargada de coordinar las acciones referentes a medidas de mitigación y adaptación del país, para lograrlo la SCC está conformada por dos unidades: Dirección Nacional de Adaptación al Cambio Climático (DNACC) y la Dirección Nacional de Mitigación al Cambio Climático (DNMCC) (Cevallos, 2013).

El total de emisiones de GEI contabilizando la absorción por sumideros naturales de Ecuador es 80.504,23 Gigagramos (Gg) de CO₂-eq (Tabla 1-2). El sector Energía es el que más emisiones GEI aporta con 44,49%, seguido del uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS) con 30,02%, el sector de agricultura con 18,03%, mientras que el sector residuos aporta con 4,16% y el sector industrial aporta con 3,30 % (Primer informe de actualización bienal ante la CMNUCC, 2016).

Tabla 1-2. Resumen del total de emisiones y absorciones de GEI en Ecuador 2010.

Sectores	Gg de CO ₂ -eq	%
Energía	35.812,52	44,49
Procesos Industriales	2.659,25	3,30
Utilización de disolventes	NE	NE
Agricultura	14.515,94	18,03
USCUSS	24.171,11	30,02
Residuos	3.345,41	4,16
TOTAL	80.504,23	100

Fuente: (Primer informe de actualización bienal ante la CMNUCC, 2016).

Las emisiones totales de CO₂ en Ecuador en el año 2010 alcanzaron un total de 77.679,08 Gg de CO₂-eq, procedentes principalmente del sector uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUS). La emisión contabilizada de CH₄ fue 11.507,83 Gg de CO₂-eq principalmente por el

sector agrícola, mientras que las emisiones de N₂O fueron de 7.350,97 Gg de CO₂-eq del sector agrícola (Primer informe de actualización bienal ante la CMNUCC, 2016).

1.2.3.1. Vulnerabilidad de Ecuador a cambios climáticos.

El diagnóstico crítico de la situación ambiental analizado por la Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador (SENPLADES, 2009) registra que el país es altamente vulnerable a los cambios en el clima por su perfil productivo agroexportador primario, tanto para poblaciones humanas como para sus ecosistemas; por lo tanto reconoce que el país necesita políticas apropiadas de adaptación y mitigación para reducir la vulnerabilidad de su economía al cambio climático (BID, 2013).

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador INAMHI (2010) considera que los factores que inciden en la vulnerabilidad del país ante las modificaciones del clima son: latitud, altitud, dirección de las cadenas montañosas, vegetación, distancia al océano, corrientes marinas y los vientos. La altitud es un factor fundamental en el Ecuador ya que la cordillera impide la penetración de los vientos cálidos y húmedos provenientes de la Costa y la Amazonia hacia la interior de las hoyas Andinas.

La variación de temperatura y precipitación en el país documentada para el periodo 1960-2006 por el INAMHI (2010) señala un incremento de la temperatura media (0,8°C), mínima absoluta (1,0°C) y máxima absoluta (1,4°C); la variación de precipitación en frecuencia e intensidad ha variado sustancialmente dependiendo de la región; en el inventario nacional de glaciares se ve reflejado que entre los años 1997 y 2006 la cubierta de los glaciares Ecuatorianos se ha reducido 27,8% (Segunda comunicación nacional sobre cambio climático, 2011, FAO, 2015b).

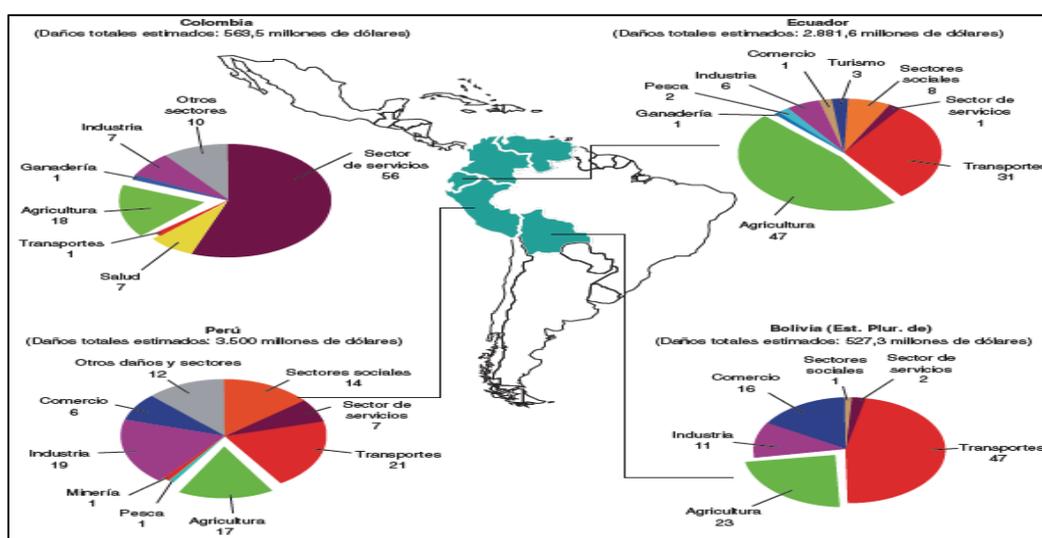


Figura 1-10. Daños causados por ENOS (1998) en la región andina.

Fuente: (Samaniego, 2009-Cepal).

1.2.3.2. Sector agropecuario en Ecuador.

El sector agropecuario tiene un papel fundamental en el desarrollo de la economía y el sector social del país; esto se ve reflejado en el ámbito del comercio exterior con 28% de participación total, siendo el segundo sector que más aporta después del petróleo PIB cuyo valor promedio en la última década fue 9%.

El sector se enfrenta a tres problemas relacionados con la variabilidad del clima. El primero de ellos está relacionado a la cantidad y calidad de agua adecuados para la producción y procesos después de la cosecha; el segundo problema es que el aumento de la temperatura y el tercer problema es la irregularidad en la pluviosidad que ya ha generado reducciones en la producción y en ocasiones pérdidas de la cosecha entera (FAO, 2015b; VanderMolen, 2011).

Diversos estudios realizados por el INAMHI y el MAE evidencian que en el periodo 2002 – 2007 las sequías causaron el 45% de las pérdidas en cultivos transitorios y el 11% en cultivos permanentes en Ecuador; estas afectaciones superaron a las causadas por inundaciones y heladas que eran los eventos que mayores impactos provocaban. A partir de esta información el Gobierno Ecuatoriano implementa el programa seguro agrícola (MAGAP, 2010).

El sector agrícola en el país genera principalmente GEI de CH₄ y N₂O, tanto por las actividades pecuarias como las prácticas agrícolas, el cultivo de arroz, el aporte antrópico de nitrógeno al suelo y la quema de residuos agrícolas, siendo el tercer generador de GEI (18,03%) de las emisiones totales (Primer informe bienal ante la CMNUCC Ecuador, 2016; FAO, 2015a).

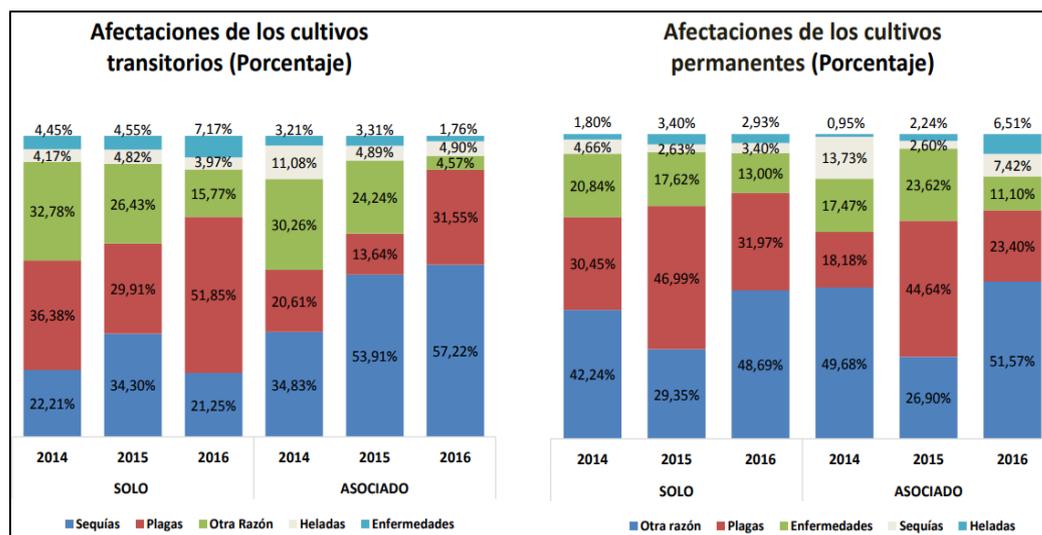


Figura 11. Principales afectaciones de la producción agropecuaria en el Ecuador. Fuente: (ESPAC, 2016).

La superficie de suelo destinada al uso en el sector agropecuario en Ecuador para el año 2016 fue 4,8 millones de hectáreas y representa el 19% del territorio nacional. Los cultivos permanentes representan el 26,70% de la superficie de labor agropecuaria y los cultivos transitorios representan el 15,76%. Solamente el 19,84% de superficie sembrada con cultivos transitorios realiza la practica de rotación año tras año (ESPAC, 2016, FAO, 2014).

En Ecuador existe una clara reducción de la superficie natural y una acelerada degradación y cambio de paisaje provocado principalmente por el cambio en el uso del suelo y la deforestación que presenta una de las tasas más altas en la región 2,4% (340,000 ha). Tomando como referencia el período 1974-2001 se estima que el porcentaje remanente de ecosistemas en Ecuador es de 55% (Jiménez, et al., 2012; FAO, 2014; ESPAC, 2016).

La producción del sector agrícola, la generación de empleo y su aporte a la economía del país ha sobredimensionado la capacidad de expansión de este sector sin tomar en cuenta las diferentes restricciones ambientales de los ecosistemas. Tan solo una pequeña parte de la superficie del país presenta vocación agrícola (24,74%), mientras que la mayor parte presenta algún tipo de restricciones a este sector (Jiménez, et al., 2012).

El incremento de la superficie dedicada a cultivos para el periodo 2000-2007 fue de 27% al 30,6%; por contraparte la superficie de montes y bosques se vio reducida en un 1,6%. Esto significó la pérdida de 310 mil ha de superficie boscosa asociada directamente al cambio en el uso del suelo, generando diferentes grados de erosión en el callejón interandino (Jiménez, et al., 2012).

El sector USCUS en Ecuador está compuesto principalmente por las emisiones y captura de CO₂ que provienen de tierras forestales, pastizales, tierras agrícolas, humedales, asentamientos y otras tierras; las emisiones son producidas por cosechas cortas de plantaciones forestales y de bosque nativo, así como el cambio en el uso de suelo principalmente hacia la agricultura (Primer informe bienal de actualización ante la CMNUCC Ecuador, 2016).

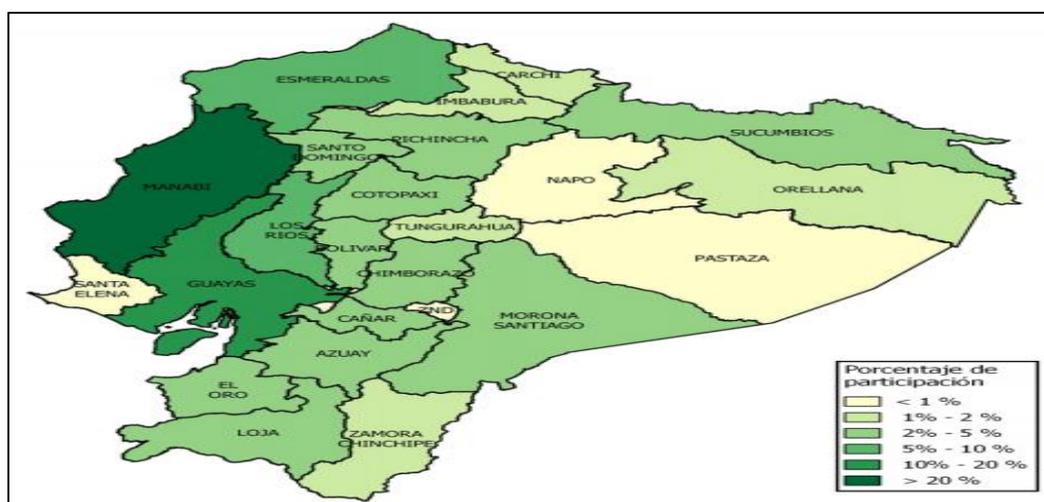


Figura1-12. Superficie de labor agropecuaria en el Ecuador.

Fuente: (INEC-ESPAC, 2016).

1.2.3.3. *Andes Ecuatorianos.*

El clima en la región Interandina o Sierra Ecuatoriana está marcado por 2 estaciones de lluvias, la primera de ellas comienza en el mes de febrero y finaliza en el mes de mayo, la segunda comienza en octubre y finaliza en noviembre. La época seca también tiene 2 estaciones; la primera inicia en junio y finaliza en septiembre y la segunda estación va de diciembre a enero y es más tenue (Segunda comunicación nacional sobre cambio climático, 2011).

Probablemente el cambio climático a escala local puede provocar tres respuestas generales en las comunidades vegetales del ecosistema Andino: desplazamiento, adaptación o extinción. Los parámetros climáticos en los Andes están condicionados por las interacciones entre temperatura y precipitación; un aumento en ambos parámetros más un aumento en la evapotranspiración afectarán los sistemas agrícolas de los páramos ecuatorianos y como consecuencia los cultivos necesitarán una mayor cantidad de agua para su desarrollo (Cuesta, et al., 2008; MAE, 2015b).

En estudios realizados por el MAGAP se evidencia que el callejón interandino de Ecuador no tiene riesgo alto de inundaciones por eventos meteorológicos extremos, pero si tiene riesgo alto debido a la erosión de sus principales cuencas hidrológicas (Tabla 1-3, MAGAP, 2014 b). Por otro lado el riesgo de sequías en el callejón interandino es alto (45%) mientras que, en toda la región Andina el riesgo de sequía es media (30-45%) y baja (15-30%) (MAGAP, 2014a).

De cierta manera el riesgo de desertificación en el callejón interandino es similar al riesgo de sequías, tomando en cuenta que en esta región existe baja precipitación y una alta evapotranspiración potencial, proceso que se intensifica por las malas prácticas agrícolas en el país (MAGAP, 2014 c).

Los Andes Ecuatorianos se consideran un importante centro global de biodiversidad agrícola que contiene un gran número de variedades silvestres de algunos de los alimentos y cultivos de fibra más importantes como, por ejemplo: papa, tomate, maíz cebada, etc. Regiones que son aptas para un determinado tipo de cultivo se pueden volver inadecuadas cuando el cambio climático desplace los microclimas hacia arriba en los Andes (Herzog, et al., 2012, Hole, et al., 2011).

Tabla 1-3. Porcentaje provincial de erosión activa y muy activa en los Andes Ecuatorianos.

PROVINCIA	% DE EROSIÓN
Azuay	6
Bolívar	3
Cañar	2
Carchi	6
Cotopaxi	1
Chimborazo	4
Imbabura	1
Loja	8
Pichincha	2

Fuente: (Jiménez, et al., 2012).

1.2.4. Provincia de Chimborazo y Cantón Riobamba en contexto del cambio climático.

El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de la ciudad de Riobamba (GADMR, 2015) determinó que el cantón Riobamba es muy vulnerable ante desastres por su alta exposición a riesgos de origen natural (volcánicas, sísmicas, climáticas) y antrópicos (incendios, explosiones) y que por tal motivo es necesario generar conocimiento sobre la ocurrencia de eventos climáticos adversos futuros para trabajar en la prevención y la toma de decisiones.

Chimborazo es la provincia con mayor riesgo de erosión y pérdida de bosque nativo en el Ecuador. Estudios realizados por Herzog, et al (2012) indican que los Andes tropicales tienen una larga historia de uso intensivo de sus tierras, que ha modificado ecosistemas y regímenes hidrológicos poniendo en riesgo biodiversidad característica (MAE, 2015 a; GADPCH, 2012).

El sector económico primario en la provincia de Chimborazo es el agropecuario con el 50% de la población económicamente activa trabajando en este sector. El mal uso y distribución de agua para riego son algunas de las causas que han deteriorado la capacidad productiva de los suelos en la provincia, provocando una expansión en la frontera agrícola y desertificación (GADPCH, 2012).

La superficie agrícola es 101,805 Has, según el censo agropecuario nacional. Los cultivos más representativos son papa, zanahoria, cebada y haba seca; además el cantón Riobamba es el mayor productor agrícola de la provincia y el cultivo de papa es el cultivo más representativo de la misma con un 22% del total de suelo sembrado (GADPCH, 2011; GADMR, 2015; MAGAP, 2000).

Un estudio realizado por Jiménez et al. (2012) determinó el índice cantonal de vulnerabilidad al cambio climático. Se tomaron en cuenta 5 variables: niveles de pobreza por necesidades básicas insatisfechas (NBI), incidencia étnica, índice de erosión, índice de variación de temperatura, y, el índice de variación de pluviosidad. Los valores del índice se estimaron para los escenarios probables A2 y B2 para el 2020. La Tabla 1-4 y Tabla 1-5 a continuación muestra esta información.

Tabla 1-4. Índice de vulnerabilidad al cambio climático escenario A2 año 2020.

Provincias	Cantones	NBI	Etnicidad	Índice precipitación	Índice Temperatura	Índice Erosión	Escenario A2
Chimborazo	Colta	93,30	85,78	52,63	60,87	83,77	70,92
Chimborazo	Guamote	96,10	92,82	64,91	65,22	69,76	73,60
Chimborazo	Pallatanga	80,60	27,78	53,51	59,42	78,03	64,17
Esmeraldas	Eloy Alfaro	97,60	75,43	58,77	62,34	55,59	67,71
Esmeraldas	Muisne	93,50	34,43	85,09	60,78	31,15	66,79
Esmeraldas	Quinindé	87,10	21,05	100,00	59,42	22,77	66,87
Esmeraldas	SanLorenzo	82,70	65,18	64,04	63,77	53,9	65,72
Esmeraldas	Rioverde	97,70	46,75	74,56	59,42	38,34	66,39
Manabí	Flavio Alfaro	91,50	1,98	73,68	57,97	77,4	70,08
Manabí	Pedernales	91,10	3,53	92,11	59,42	34,46	66,96

Ponderación= NBI=0,20; Etnicidad=0,30; Precipitación=0,30; Temperatura=0,30, Erosión=0,10

Fuente: (Jiménez, et al., 2012).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Tabla 1-5. Índice de vulnerabilidad al cambio climático escenario B2 año 2020.

Provincias	Cantones	NBI	Etnicidad	Índice precipitación	Índice Temperatura	Índice Erosión	Escenario B2
Bolívar	Guaranda	77,80	44,30	100,00	76,79	67,76	79,80
Cotopaxi	Pujilí	87,80	55,57	90,48	78,57	62,48	80,08
Cotopaxi	Sigchos	93,90	41,15	80,95	78,57	73,27	78,08
Chimborazo	Colta	93,30	93,30	88,89	78,57	83,77	85,85
Chimborazo	Chambo	71,80	71,80	87,30	81,25	67,92	74,14
Chimborazo	Guamote	96,10	96,10	92,06	82,14	69,76	87,74
Chimborazo	Guano	83,40	83,40	88,89	80,36	50,52	73,93
Chimborazo	Pallatanga	80,60	80,60	90,48	77,68	78,03	77,15
Chimborazo	Penipe	72,50	72,50	84,10	81,25	72,65	71,62
Tungurahua	Tisaleo	88,80	10,02	88,89	79,46	73,11	76,58
Ponderación= NBI=0,20; Etnicidad=0,30; Precipitación=0,30; Temperatura=0,30, Erosión=0,10							

Fuente: (Jiménez, et al., 2012).

Tras analizar las tablas de índice de vulnerabilidad cantonal al cambio climático en los escenarios A2 y B2 para el año 2020, se puede concluir que la provincia de Chimborazo es la más vulnerable; 7 de sus 10 cantones figuran como vulnerables para el escenario B2 y 3 cantones en el escenario A2 siendo Chimborazo la única provincia presente en ambos escenarios.

1.2.4.1. Clasificación de los cultivos relevantes en la provincia de Chimborazo.

Para la selección del cultivo más relevante en la provincia de Chimborazo se realizó una clasificación de acuerdo al mayor rendimiento basado en los reportes dinámicos ESPAC periodo 2002-2016 (INEC, 2016), cultivos detectados como vulnerables en la región (Zapata, et al., 2011) y a aquellos productos que contribuyen a la seguridad alimentaria del país basados en las tendencias de su demanda a nivel nacional (GADPCH, 2011).

Los cultivos con mayor demanda en el cantón Riobamba son: con papa, haba, cebada; Colta con papa, cebolla, maíz suave; Guamote con papa, cebada, chocho; Guano con maíz suave, papa, cebolla; Alausí con trigo, frejol, papa; Pallatanga con frejol, tomate, papa, maíz suave; Cumanda con cacao, caña de azúcar, arroz; Chambo con maíz suave, papa, brócoli; Penipe con maíz suave, frejol, papa, y Chunchi con papa, cebada, trigo (GADPCH, 2011).

Los cultivos más vulnerables al cambio climático en la región Andina para el año 2050 fueron definidos por un estudio realizado por Zapata, et al., (2011) y son café, papa, tomate, frejol, maíz. Exclusivamente para Ecuador el estudio identificó los cultivos que son vulnerables al cambio climático y estos son: Arracacha, Arveja, Cebada, Papa, Lechuga, Quinoa, Trigo y Ulluco; varios de estos productos se cultivan actualmente en la provincia de Chimborazo.

1.2.4.2. Caracterización del cultivo de papa.

El cultivo de la papa en los Andes Latinoamericanos se remonta a tiempos prehispánicos donde se podían identificar más de 5000 cultivares de papa; en la actualidad en la región Andina se cultivan menos de 500 y más específicamente en el Ecuador se siembran normalmente 30 cultivares, siendo el más representativo de estos el de la papa Superchola (*Solanum Tuberosa*) con alrededor del 50% de la superficie cultivada en el país. Esta tendencia se cumple tanto para el cantón Riobamba como para la provincia de Chimborazo (Cuesta et al., 2002).

La producción de papa en el Ecuador se distribuye en 3 regiones geográficas de su serranía (norte, centro y sur) en condiciones de subpáramo y particularmente en páramo húmedo. Debido a la latitud (0°) y a los efectos de la altitud (2200 m.s.n.m a 3600 m.s.n.m), las variaciones de temperatura (17 a 20 °C), precipitación (600 a 1200 mm) y radiación solar (400 a 500 W/m²) condicionan la producción de la papa (Figura 1-13) (Cuesta et al., 2002).

Los cantones Riobamba y Colta comprenden la zona productora occidental de papa en la provincia de Chimborazo donde la siembra se realiza en los meses de octubre y diciembre. Típicamente la papa se rota con los cereales cebada, trigo, centeno y maíz; en el cantón Riobamba la superficie plantada con el cultivo de papa es de 587,80 Ha (Cuesta et al., 2002; Ortiz & Wissar, 1988; MAGAP, 2000).

Los eventos ENOS en algunas ocasiones pueden influir positivamente sobre el rendimiento productivo del cultivo de papa, a causa de la distribución anómala de precipitaciones que permite satisfacer las necesidades de líquido vital de este cultivo. Sin embargo, el aumento de la disponibilidad hídrica puede incrementar considerablemente el ataque de plagas como es el caso de la polilla guatemalteca (Rojas, 2011).

Generalmente el tipo de cultivo de secano (cereales, hortalizas, árboles frutales, etc.) al cual pertenece la papa, se ven muy afectados por la pérdida de nubosidad causada el fenómeno del Niño aumentado la incidencia de radiación solar sobre ellos, lo cual causa una mayor evapotranspiración llegando a causar daños irreversibles en el ciclo vegetativo de estos cultivos (Rojas, 2011).

Por otro lado, se espera que el cambio climático en la región Andina aumente significativamente la temperatura provocando un aumento en la transpiración y la demanda hídrica de los cultivos. Por ende, en aquellas zonas secas presentes en la sierra ecuatoriana que poseen un deficiente acceso a sistemas de riego se espera serios inconvenientes con el estrés hídrico, y una considerable disminución en el rendimiento productivo del cultivo de papa. Sin embargo, el aumento de temperatura puede propiciar el sembrío de este cultivo en altitudes donde previamente era inviable, en detrimento de la expansión agrícola y sus severas implicaciones ambientales por la erosión de páramos y pastizales (Rojas, 2011).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

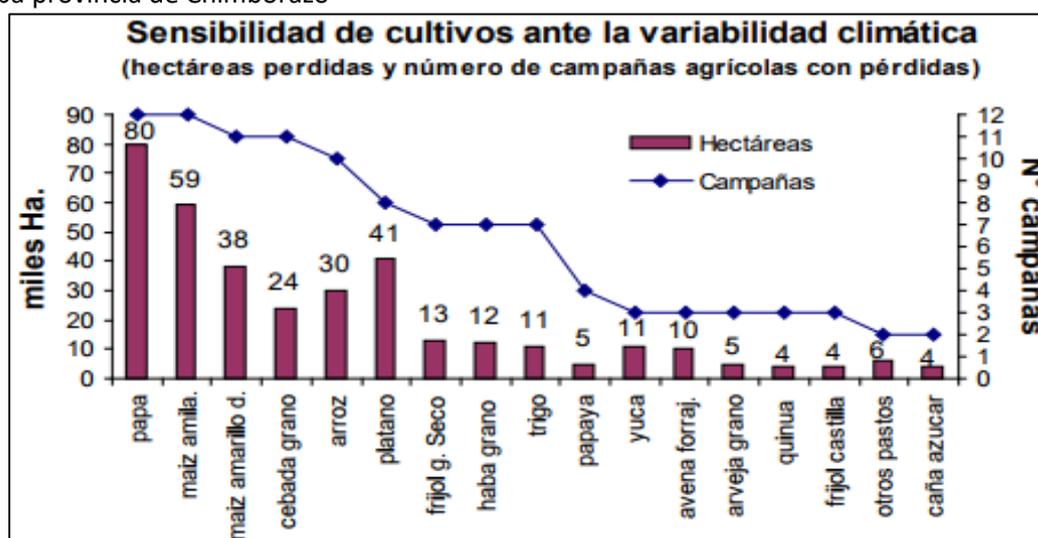


Figura1-13. Sensibilidad de cultivos de ante la variabilidad climática.

Fuente: (Vargas, 2009).

1.2.4.3. Datos climáticos de la provincia de Chimborazo.

La variabilidad climática hace referencia a la variación del estado medio y a otras funciones estadísticas (desviación estándar, sucesos extremos, etc.) del clima a escala temporal y espacial más amplia que la ocurrencia de fenómenos meteorológicos; la variabilidad climática se debe a procesos internos naturales del sistema climático (forzamientos internos) y/o a variaciones de procesos externos naturales o antropogénicos (forzamientos externos) (IPCC, 2007).

Estudios recientes demuestran que el aumento de temperatura en la región Andina es más evidente en las series de temperatura mínima que en la de la temperatura máxima, pero en conjunto es más evidente en la temperatura media. La variabilidad en dichas series en la provincia de Chimborazo está ajustada con esta tendencia mientras que la variación de la precipitación en la región Andina tiene una mayor inclinación hacia la disminución (Tabla 1-6) (Herzog, et al., 2012, Cáceres, 1998).

Tabla 1-6. Variación porcentual de la precipitación en la región Sierra del Ecuador respecto al año base.

Provincia	ESCENARIO A2 IPCC					VARIACIÓN PORCENTUAL					
	Área Km ²	Año base mm/día	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	Promedio
Azuay	8.171,85	6,06	2,48	0,50	0,33	1,65	5,45	2,64	5,45	15,51	4,25
Bolívar	3.945,48	6,48	-6,71	-9,26	-8,80	-6,48	-3,40	-12,96	-13,43	-4,01	-8,13
Cañar	3.145,52	5,76	2,26	0,00	0,00	1,39	5,21	2,95	3,13	15,97	3,86
Carchi	3.779,09	6,03	2,32	1,16	1,82	2,16	2,99	5,31	2,65	9,78	3,52
Cotopaxi	6.105,47	5,31	-7,34	-9,60	-9,04	-7,53	-6,21	-13,94	-19,02	-8,85	-10,19
Chimborazo	6.501,76	7,43	-7,67	-8,61	-8,34	-7,94	-7,13	-15,88	-21,00	-14,67	-11,41
Imbabura	4.576,76	5,03	0,20	-1,59	-0,80	-0,20	0,99	1,59	-0,60	6,56	0,77
Loja	11.062,25	3,47	6,92	4,90	3,17	5,48	12,39	11,53	17,00	30,55	11,49
Pichincha	9.535,88	5,09	-2,95	-4,72	-4,13	-3,34	-2,55	-3,93	-8,45	0,20	-3,73
Tungurahua	3.386,39	6,19	-6,95	-7,92	-7,75	-7,27	-6,62	-12,60	-19,71	-12,60	-10,18

Fuente: (Jiménez, et al., 2012).

Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Universo de estudio

El Cantón Riobamba tiene una población de 225.741 habitantes y se encuentra ubicado a 2750 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) en la región Sierra Central del Ecuador a 188 Km en dirección sur de la capital Quito (Tablas 2-1,2-2 y Figura 2-1); es la capital de la provincia de Chimborazo y principal sostén económico de la provincia. Su clima está caracterizado por ser ecuatorial mesotérmico semi húmedo con, un promedio histórico de precipitación de 561 mm anual y un promedio de temperatura es de 13°C (GADMR, 2015).

Tabla 2-1. Coordenada UTM WGS 84 zona 17S del Cantón Riobamba.

Coordenadas UTM WGS84 ZONA 17S	
Norte	9814766.08 m
Este	761644.47 m

Fuente: (Instituto Geográfico Militar del Ecuador, 2017)

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 2-2. Límites del Cantón Riobamba.

Límites	Cantones y Provincia
Norte	Cantones de Guano y Penipe
Sur	Cantones de Colta y Guamote
Este	Cantón Chambo
Oeste	Provincia de Bolívar

Fuente: (GADMR, 2015).

Fuente: (Elaboración propia).



Figura 2-1. Límites Geográficos del Cantón Riobamba.

Fuente: (GADMR, 2015).

2.2. Elección de la estación meteorológica para el análisis de datos

La elección de la estación meteorológica a partir de la cual se utilizaron los datos para el análisis en esta investigación se hizo a partir de dos principios fundamentales: el primero de ellos fue la cercanía del emplazamiento de las estaciones al sitio de estudio (realizando pruebas estadísticas de correlación entre las estaciones seleccionadas) y el segundo de ellos la cantidad y calidad de los datos meteorológicos de interés.

Bajo estos principios inicialmente se seleccionaron tres estaciones meteorológicas tras realizar las pruebas estadísticas de correlación y covarianza utilizando datos históricos correspondientes al periodo de tiempo entre los años 1964 a 1973 de las variables temperatura, humedad y precipitación obtenidos a partir de estudios realizados por INAMHI (2010), obteniendo como resultado las siguientes ciudades: Ambato, Guaslán y Riobamba.

Se procedió a identificar las estaciones más cercanas que en orden son: Riobamba, Guaslán y Ambato. En cuanto al segundo principio se determinó la estación con la mayor cantidad y calidad de datos que orden son: Riobamba (datos completos), Ambato (ausencia de pocos datos) y Guaslán (ausencia de la mayor parte de datos). Tras analizar ambos principios la estación elegida para esta investigación es Riobamba (Tabla 2-3, Figura 2-2) (Convenio ESPOCH-INAMHI MA10).

Tabla 2-3. Ubicación de la estación meteorológica Riobamba en coordenadas UTM WGS 84.

Coordenadas UTM WGS84 ZONA 17S	
Norte	9817387.06 m
Este	757547.41 m

Fuente: (Google Earth, 2018).



Figura 2-2. Estación meteorológica ESPOCH-INAMHI.

Fuente: (Elaboración propia).

2.3. Metodología para el análisis del rendimiento productivo del cultivo de papa

Para determinar el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo se analizó la información disponible en organismos oficiales del Ecuador, específicamente los datos fueron obtenidos del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2016) y del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2016) en el Sistema de información pública agropecuaria (SIPA) y de la Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC) respectivamente.

En primer lugar, se inició el relevamiento de los datos útiles para la investigación que en este caso fueron la superficie cosechada en hectáreas (Has) y la producción en toneladas métricas (Tm) para el cálculo del rendimiento productivo en (Tm/Has); se procedió a identificar la serie temporal continua más larga con datos completos y finalmente se elaboró un gráfico de dispersión en Excel para reflejar la evolución del rendimiento productivo en el tiempo.

La serie temporal continúa más larga está comprendida entre el año 2002-2016, es decir 15 años y los datos obtenidos corresponden a promedios anuales del rendimiento del cultivo de papa debido a que el cultivo de papa es estacional. Los datos obtenidos del rendimiento del cultivo son la sumatoria de todas las cosechas en el cantón a lo largo del año y resulta imposible obtener al menos un promedio mensual.

2.4. Metodología para el análisis de las series temporales de las variables meteorológicas

Las series temporales de las variables meteorológicas temperatura, precipitación, humedad y radiación solar que fueron estudiadas en esta investigación fueron obtenidas de la estación meteorológica ESPOCH-INAMHI con código nacional MA10; todos los datos obtenidos de dicha estación están debidamente validados por el ente rector de estudios meteorológicos e hidrológicos en el país que en este caso es el INAMHI.

La serie temporal más larga para cada variable meteorológica estudiada corresponde a un lapso de tiempo de 15 años comprendido entre el año 2002 y 2016. Los datos completos y validados para su estudio, corresponden a datos diarios para cada una de las variables meteorológicas de interés que posteriormente fueron tratados estadísticamente para obtener promedios mensuales y anuales. Para el análisis de la serie temporal 2002-2016 con respecto a las variables temperatura máxima, mínima y media, así como humedad, precipitación y radiación solar se elaboraron gráficos de dispersión en Excel para cada variable meteorológica y finalmente se obtuvo la media de cada una de dichas variables estudiadas para posteriormente analizar su evolución respecto a la serie temporal 2002-2016 de 15 años.

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Finalmente, para el presente estudio se calculó la evapotranspiración en el cantón Riobamba utilizando el método de Holdridge. Este método por su simpleza mismo fue probado, calibrado y validado para la ciudad de Riobamba mediante un estudio realizado por Vega & Jara (2009).

La fórmula utilizada viene dada por:

$$E_{to}=C_{ho}*TP \quad (1)$$

Donde E_{to} es la evapotranspiración de referencia expresada en (mm/día); C_{ho} es el coeficiente en función de alguna variable meteorológica que relaciona mejor sus valores En el caso de Riobamba y al tratarse de un promedio anual el valor de este coeficiente para el presente caso de estudio fue: 58,93; finalmente TP es la temperatura media del aire expresada en (°C).

Los valores obtenidos corresponden a datos diarios de la variable meteorológica de interés que posteriormente fueron tratados estadísticamente para obtener promedios mensuales y anuales.

2.5. Metodología para el análisis de las propiedades químicas del suelo

Para el análisis de las propiedades químicas del suelo relevantes para el cultivo de papa en el cantón Riobamba-Ecuador, se tomó como punto de partida estudios realizados en la provincia de Chimborazo por Cuesta et al., (2002) el cultivo de papa extrae grandes cantidades de nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y potasio (K) para su correcto crecimiento y desarrollo.

El estudio además llegara a la conclusión que un bajo contenido de humedad en el suelo asociado a que los suelos en el Ecuador y particularmente en la provincia de Chimborazo tienen un pH ácido a ligeramente ácido (<6,4) dificulta la absorción de nutrientes por parte del cultivo de papa sumado a que la disponibilidad de potasio en el suelo de la serranía ecuatoriana y en el cantón Riobamba es limitado.

Las propiedades químicas del suelo nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre y potasio), pH y humedad son variables que tienen influencia directa sobre el rendimiento del cultivo de papa en el Ecuador, sin embargo, su cuantificación resulta imposible en especial si consideramos los pequeños agricultores, ya que cada uno tiene un determinado tipo y tiempo de siembra, así como cada lugar donde se cultiva la papa tiene propiedades químicas muy particulares.

Dada esta dificultad, en el presente análisis se consideró sólo la evapotranspiración como cualidad susceptible de ser afectada por el cambio climático, asumiendo que los resultados que se obtendrán a partir de este análisis tendrán validez si las condiciones adicionales del suelo se mantienen más o menos estables en la próxima década.

2.6. Correlación de las series temporales de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo del cultivo de papa

Una vez realizado el análisis del rendimiento productivo del cultivo de papa y el análisis de las series temporales comprendidas entre el año 2002 y el año 2016 de las variables meteorológicas temperatura máxima, mínima y media, humedad, precipitación, radiación solar y evapotranspiración, se procedió a realizar correlaciones entre las variables, mediante el uso de pruebas estadísticas como la covarianza, correlación y coeficiente de determinación en EXCEL.

El uso de la covarianza nos permite conocer si ambas variables crecen en el mismo sentido o sentido contrario; es decir si en el primer caso el rendimiento del cultivo de papa ha ido en aumento y las variables meteorológicas han tenido un comportamiento similar, la covarianza adquiere un valor positivo y se determina que ambas crecen en el mismo sentido; por otro lado si el rendimiento del cultivo ha decrecido para el mismo periodo de tiempo y las variables meteorológicas han aumentado o viceversa la covarianza adquiere un número negativo y se concluye que las variables tienen un sentido opuesto.

Por otro lado, el uso del coeficiente de correlación nos permite conocer el grado de relación lineal que tienen las dos variables en estudio. Este coeficiente puede tomar valores comprendidos entre -1 a 1 siendo -1 una relación lineal perfecta negativa, 0 implica que no existe relación lineal alguna y 1 significa que exista una relación lineal positiva perfecta algo que en la práctica es muy poco probable. Es muy importante indicar que no importa cuán fuerte sea una correlación la misma no indica causalidad (Figura 2-3).

El coeficiente de determinación no es más que el coeficiente de correlación elevado al cuadrado y expresado como el resultado de la regresión lineal de la recta que se forma en el gráfico de dispersión de las variables de estudio. Al igual que el coeficiente de correlación, el de dispersión toma valores comprendidos entre -1 a 1, donde -1 indica que el modelo aplicado es poco idóneo para realizar predicciones y 1 indica que el modelo utilizado es muy idóneo para realizar predicciones del comportamiento futuro tanto del rendimiento del cultivo de papa como de las variables meteorológicas.

Para validar las pruebas estadísticas de correlación es necesario calcular la significancia (p) del coeficiente de correlación (r) de las variables meteorológicas en estudio con el rendimiento productivo del cultivo del cultivo; para ello tenemos que plantear dos hipótesis: la hipótesis nula nos dice que: $H_0 =$ El coeficiente de correlación (r) procede de una relación cuyo valor es cero ($p=0$) y la hipótesis alternativa nos dice que: $H_1 =$ El coeficiente de correlación (r) procede de una relación cuyo valor es distinta que cero ($p \neq 0$).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Para la comprobación de las hipótesis realizamos una prueba estadística t-student de dos colas con una confianza asumida, α , del 95% (0,05) definida por la ecuación

$$t = \frac{r-0}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}}, (2)$$

Donde r es el valor absoluto del coeficiente de correlación de Pearson, r^2 es el coeficiente de determinación y N el número de observaciones.

Aplicando la prueba estadística (t) podemos comprobar o rechazar la hipótesis nula o alternativa de la siguiente manera:

- Si $t > t(\alpha, N-2)$ entonces se rechaza la hipótesis nula ya que la correlación obtenida no procede de una relación cuyo valor $p=0$ y por lo tanto se concluye que las variables están relacionadas.
- Si $t < t(\alpha, N-2)$ entonces se acepta la hipótesis nula ya que la correlación obtenida procede de una relación cuyo valor $p=0$ y por lo tanto se concluye que las variables no están relacionadas.

Finalmente se procede a verificar cuanto es el aporte de cada variable meteorológica en estudio por separado o combinadas con el rendimiento del cultivo; esto es, explicado partiendo del coeficiente de determinación o el coeficiente de no determinación, al transformarlos en porcentaje obtenemos la porción de varianza compartido entre rendimiento y/o la o las variables en estudio y por otro lado el porcentaje de rendimiento que queda por explicar por la variable.

Cabe recordar que además de considerar la correlación lineal se analizaron las de otro tipo, siendo la lineal la más representativa.

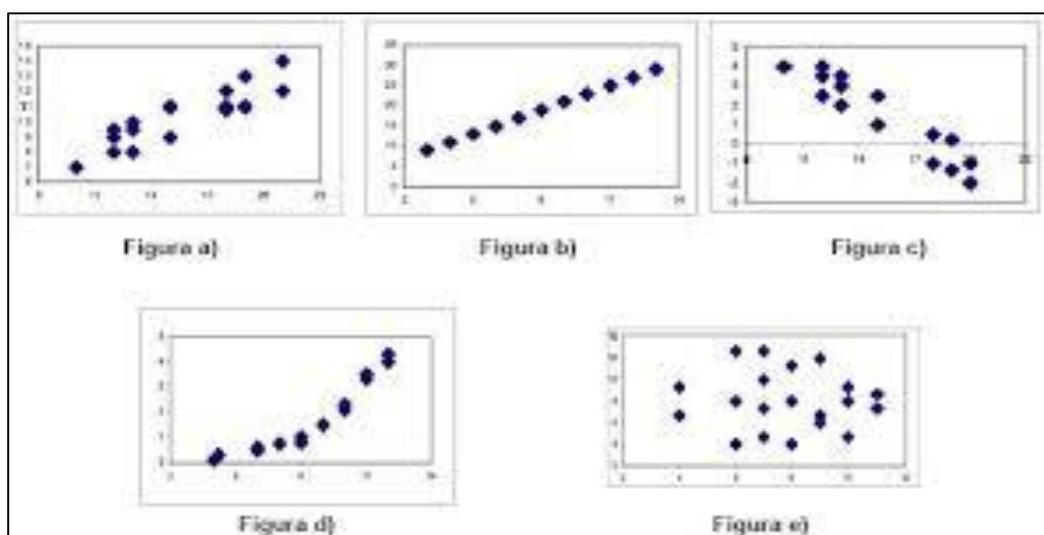


Figura 2-3.Ejemplos de distintos tipos de correlación.
Fuente: (Lavalle, Micheli & Rubio; 2006).

2.7.Determinación del porcentaje de influencia de cada variable meteorológica

Para la determinación del porcentaje de influencia de las variables meteorológicas sobre el rendimiento del cultivo, se utilizó la herramienta estadística denominada análisis de componentes principales (ACP) disponible en el software XLSTAT como una interfaz auxiliar de las hojas de EXCEL. En estadística, el análisis de componentes principales es una técnica utilizada para describir un grupo de datos en términos de nuevas variables denominadas componentes, no correlacionadas. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos.

Técnicamente, el ACP busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. Esta convierte un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas componentes principales. El ACP como primer resultado tiene la estadística descriptiva (máxima, mínima, media y desviación típica) de las variables meteorológicas en estudio, así como también del rendimiento productivo del cultivo. Para este caso en segundo lugar el software nos proporciona información en una matriz sobre las correlaciones existentes entre el rendimiento del cultivo y las variables en estudio.

Por otro lado, para la interpretación del ACP como tal el software presenta el porcentaje total de datos de las variables contenidos en dos ejes (vertical y horizontal), denotados como F1, F2, F3, etc. Dependiendo del número de variables, una vez seleccionado el conjunto de variables con mayor representación de datos, el software nos presenta una matriz con los cosenos cuadrados de las mismas. Esta matriz de cosenos cuadrados también refleja el grado de correlación entre las variables analizadas.

Los valores subrayados en negrita en la matriz anteriormente mencionada corresponden a los valores para cada variable del factor para el cual el coseno cuadrado es el mayor; en este caso de estudio denotadas como F1 (Abscisas-eje horizontal) y F2 (Ordenadas-eje vertical) por contener la mayor cantidad de datos en relación a otra combinación de factores; las variables meteorológicas contenidas en F1 no estarán presentes en F2 y viceversa.

Una vez identificados los factores en el punto anterior el software XLSTAT construye un gráfico que representa las variables en estudio mediante el uso de vectores rojos y tienen que ser interpretados en términos de ángulos, sea entre las mismas variables o entre las variables y las dimensiones del análisis ACP, los ángulos más cercanos a la parte superior en relación a F1 nos indican que su correlación es positiva.

Por otro lado, los ángulos obtusos representan las variables que no están relacionadas entre sí y adquiere un valor negativo en la correlación dependiendo si la variable se encuentra en el eje

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

vertical u horizontal. Es muy importante tomar en cuenta qué si los vectores que representan las variables son muy cortos en cualquiera de las 2 dimensiones del gráfico el mismo no representa de la mejor manera el análisis ACP y tiene que volverse a graficar con otro factor.

Finalmente, el software construye un gráfico biplot donde está representado el rendimiento del cultivo de papa y la interpretación de este gráfico nos permite conocer que variables meteorológicas tienen mejor correlación con el rendimiento del cultivo sea esta positiva o negativa, de igual manera el gráfico nos permite interpretar que variables no tienen relación alguna con el rendimiento del cultivo o poseen una pobre correlación con el mismo.

2.8. Proyecciones de escenarios climáticos futuros

Las proyecciones de escenarios climáticos futuros de las variables meteorológicas, así como del rendimiento, se realizaron mediante el uso del modelo estadístico auto regresivo integrado de media móvil (ARIMA) disponible en el software XLSTAT forecast, utilizando el promedio mensual y anual de datos para el periodo 2002-2017.

En un estudio realizado por Aguado et al., (2016) se determinó que para la predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA es necesario contar con al menos 50 datos para tener una predicción confiable; sin embargo, en caso de utilizarse una menor cantidad de datos las predicciones carecen de confiabilidad estadística, pero se puede observar la tendencia a futuro de las variables meteorológicas.

Se elaboraron predicciones de todas las variables meteorológicas en estudio para el año 2020 utilizando el promedio mensual de las mismas. Estas predicciones pueden ser consideradas como de alta fidelidad ya que la cantidad de datos empleados en el modelo ARIMA fue muy superior a los 50 datos considerados como mínimos para obtener resultados confiables. Otro factor a consideración es que el modelo fue calibrado y validado para un periodo de 12 meses.

Para consolidar las tendencias obtenidas este análisis se extendió hasta el año 2050 utilizando el promedio anual de las mismas. Nuevamente, es de destacar que los datos empleados para estas proyecciones no cumplen con el mínimo requisito del modelo ARIMA para tener calidad estadística, sin embargo estas proyecciones fueron realizadas con la finalidad de determinar la tendencia de las variables en estudio para un futuro cercano.

Con la finalidad de identificar si las series temporales en estudio que fueron proyectadas presentan una tendencia estacional se utilizó la prueba de Mann-Kendall. En primer lugar, tenemos que establecer que la hipótesis nula H_0 : no presenta una tendencia lineal y la hipótesis alternativa (H_a): presenta una tendencia lineal, para aceptar o rechazar la hipótesis nula el valor de p tiene que

ser distinto de 0, si el valor de p es menor o igual que un 5% la hipótesis nula será rechazada estadísticamente y si el valor de p es mayor entonces será aceptada, este método ha sido ampliamente utilizado en series climatológicas.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1. Elección de la estación meteorológica para el análisis de datos

Una vez que se lograron identificar las estaciones más cercanas al sitio de estudio (Riobamba en el sitio, Guaslán 23Km y Ambato 57 Km) se procedió a realizar pruebas estadísticas de correlación, covarianza y coeficiente de determinación de las temperaturas máximas, mínimas y medias para el periodo, con el objetivo de seleccionar la fuente de datos más pertinente para el análisis del cultivo de papa. Los resultados se muestran en las tablas 3-1 y 3-2.

Tabla 3-1. Pruebas estadísticas de correlación entre las estaciones de Riobamba y Ambato.

Periodo 1964-1973												
Estación	Temp. Máxima	Covarianza	Correlación	Determinación N	Temp. Mínima	Covarianza	Correlación	Determinación	Temp. Media	Covarianza	Correlación	Determinación
Riobamba	20,8	0,88	0,94	0,89	7,6	0,35	0,97	0,93	13,9	0,37	0,98	0,98
	20,7				7,8				14,1			
	20,0				7,6				13,7			
	20,1				8,2				13,7			
	20,1				8,1				13,7			
	18,9				6,8				12,7			
	18,9				6,4				12,4			
	19,2				5,9				12,7			
	20,1				6,5				13,0			
	20,9				7,4				13,9			
	21,3				7,2				14,1			
	21,4				7,0				14,0			
Ambato	19,2	0,88	0,94	0,89	8,9	0,35	0,97	0,93	13,0	0,37	0,98	0,98
	19,4				9,1				13,2			
	18,9				9,1				12,9			
	19,3				9,4				13,2			
	18,7				9,0				12,9			
	17,3				8,2				12,0			
	16,8				8,1				11,6			
	17,3				7,7				11,7			
	18,3				8,1				12,3			
	19,6				8,5				13,0			
	20,2				8,6				13,4			
	19,6				8,5				13,1			

Fuente: (INAMHI, 2016).

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Tabla 3-2. Pruebas estadísticas de correlación entre las estaciones de Riobamba y Guaslán.

Periodo 1964-1973												
Estación	Temp. Máxima	Covarianza	Correlación	Determinación	Temp. Mínima	Covarianza	Correlación	Determinación	Temp. Media	Covarianza	Correlación	Determinación
Riobamba	20,8	0,72	0,99	0,97	7,6	0,43	0,93	0,86	13,9	0,38	0,98	0,98
	20,7				14,1							
	20,0				13,7							
	20,1				13,7							
	20,1				13,7							
	18,9				12,7							
	18,9				12,4							
	19,2				12,7							
	20,1				13,0							
	20,9				13,9							
	21,3				14,1							
	21,4				14,0							
	20,5				14,1							
	20,5				14,2							
Guaslán	20,0	0,72	0,99	0,97	8,8	0,43	0,93	0,86	13,8	0,38	0,98	0,98
	20,2				14,1							
	20,1				14,0							
	18,9				13,0							
	18,8				12,7							
	19,2				12,8							
	19,8				13,4							
	20,9				14,2							
	21,4				14,4							
	21,2				14,4							
	20,0				13,8							
	20,2				14,1							
	20,1				14,0							
	18,9				13,0							
18,8	12,7											
19,2	12,8											
19,8	13,4											
20,9	14,2											
21,4	14,4											
21,2	14,4											

Fuente: (INAMHI, 2016).

Fuente: (Elaboración propia).

Las pruebas estadísticas indican que existe una relación lineal positiva fuerte entre las tres estaciones, pero se seleccionó la estación en Riobamba porque es la que presenta mejores indicadores respecto al cultivo, como la distancia al sitio de estudio y la mayor cantidad de datos validados.

3.2. Análisis del rendimiento productivo del cultivo de papa

En la siguiente tabla (Tabla 3-3) se muestra la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2002 – 2016, obtenido a partir de los datos proporcionados por (INEC, 2016) y (MAGAP, 2016). Dado que como se mencionó en el capítulo 1, el fenómeno ENOS tiene un fuerte impacto en el clima de la región, en la misma tabla se incorporaron los valores anuales del índice del Niño Oceánico (INOS) para su posterior utilización y análisis.

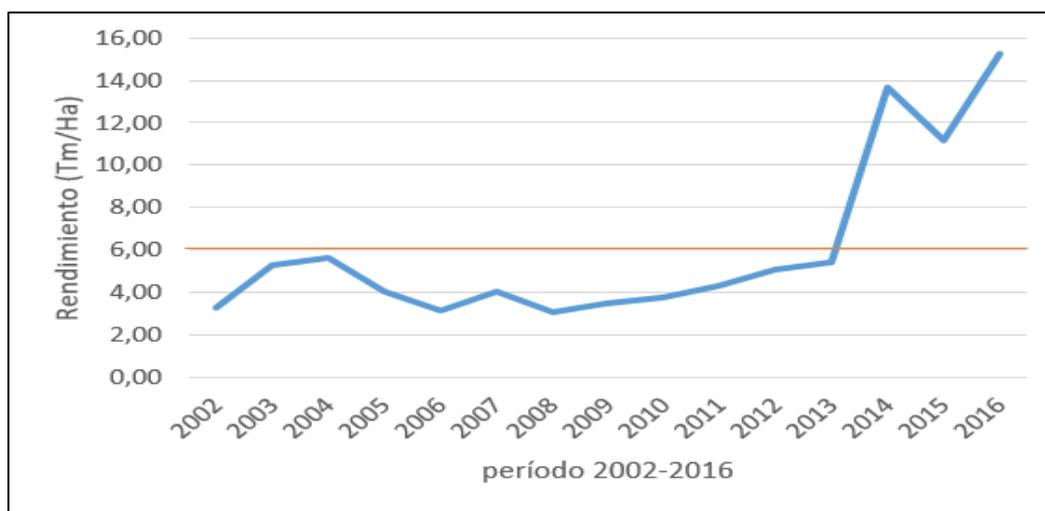
Tabla 3-3. Rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

CULTIVO	AÑO	SUPERFICIE COSECHADA (Has)	Producción (Tm)	Rendimiento Productivo (Tm/Has)	Índice del Niño Oceánico
Papa	2002	15190	49521	3,26	0,63
	2003	14721	77492	5,26	0,26
	2004	17764	100591	5,66	0,46
	2005	12045	48903	4,06	0,03
	2006	15072	47647	3,16	0,09
	2007	14421	58273	4,04	-0,57
	2008	12427	38005	3,06	-0,76
	2009	13605	47133	3,46	0,33
	2010	12509	47607	3,81	-0,47
	2011	11098	47882	4,31	-0,84
	2012	10015	50657	5,06	-0,13
	2013	14848	80766	5,44	-0,29
	2014	6242	85260	13,66	0,13
	2015	3939	44093	11,19	1,48
2016	7450	113588	15,25	0,36	

Fuente: (MAGAP; INEC, 2016).

Fuente: (Elaboración propia).

(a)



(b)

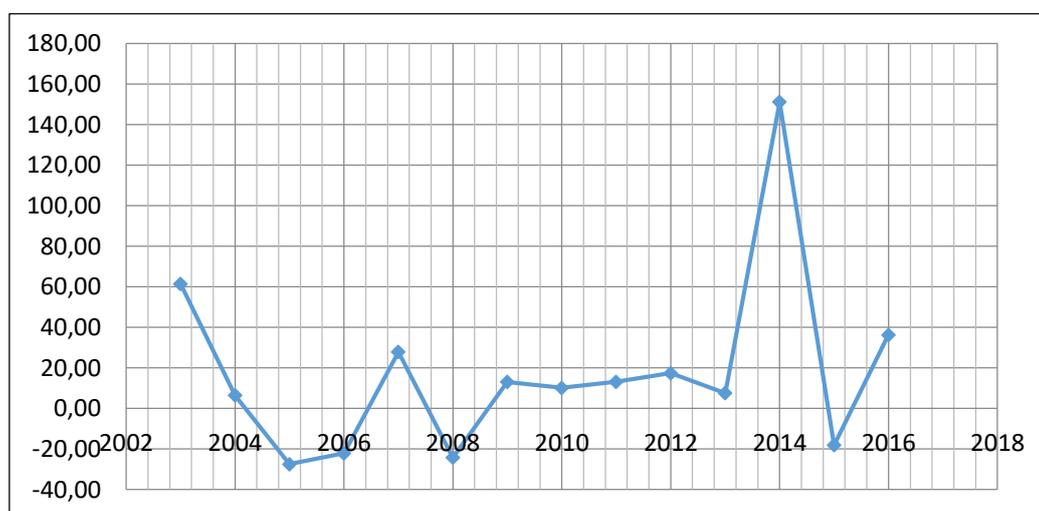


Figura 3-1. a) Rendimiento productivo del cultivo de papa y b) tasa de crecimiento del rendimiento.
Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

De acuerdo a la Figura 3-1, la media histórica del rendimiento del cultivo de papa para el periodo 2002-2016 es de 6,05, con una desviación estándar cercana a 3.8. Se observa además en la figura que en el rendimiento hay un incremento a partir del año 2013 con relación a la media histórica y una pequeña disminución en el año 2015. Los mismos máximos y mínimos relativos se pueden apreciar también en la tasa de crecimiento (Figura 3-1 b). Este comportamiento podría estar relacionado a los eventos del Niño (2015-2016) y la Niña (2006-2007; 2008-2009) (Figura 3-2).

El efecto climático de esta oscilación en ambas fases, depende de la época del año en que se presenta la fase extrema del fenómeno, pero en Ecuador la fase positiva está fuertemente asociada a incrementos de temperatura y alteraciones en el patrón de precipitaciones que conlleva un descenso de pluviosidad y una subsiguiente sequía. La fase contraria, se asocia a un fuerte incremento en las precipitaciones y temperatura superficial fría.

Ambos fenómenos en conjunto con la radiación solar presente en la zona ecuatorial y las características particulares que aporta la cordillera de los Andes, provocan un fuerte impacto en el rendimiento de los cultivos del Ecuador y resto de la región Andina (Ramírez & Jaramillo, 2009; Ávila, Carvajal & Gutiérrez, 2014; Hidalgo, 2017). Para analizar esta posible conexión entre el cultivo y el fenómeno ENOS, se estudió en primer lugar la posible existencia de una correlación directa entre el rendimiento de papa y los valores de INOS de la tabla 3-3.

En este punto hay que mencionar que en general las correlaciones que involucran el fenómeno ENOS suelen testearse con valores mensuales dado que el Niño(a) tienen un comportamiento marcadamente estacional; sin embargo en esta oportunidad se utilizaron valores anuales dada que los datos de rendimiento disponibles son solamente anuales. La Tabla 3-4 muestra los valores estadísticos de la correlación y la Figura 3-2 en comportamiento de ambas variables.

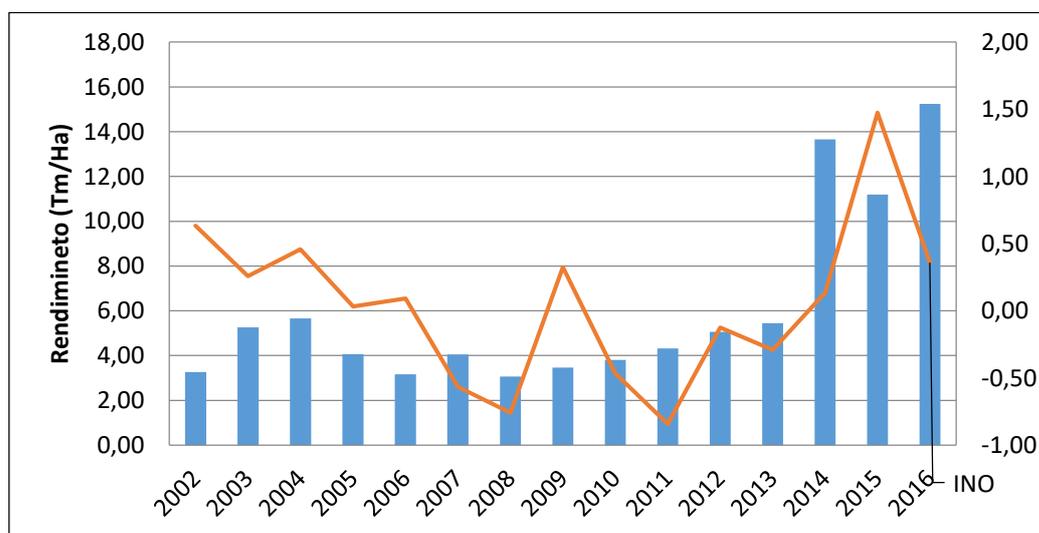


Figura 3-2. Rendimiento del cultivo de papa en el cantón Riobamba en relación al Índice del Niño Oceánico (INO).

Fuente: (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA, 2018).

Tabla 3-4. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre el rendimiento productivo del cultivo de papa y el Índice del Niño Oceánico (INO)

Pruebas estadísticas de correlación		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	1,06	Misma dirección
Correlación de Pearson (r)	0,45	Relación lineal positiva
Coefficiente de determinación (R ²)	0,20	Ajuste bajo del modelo
Significancia (p)	1,80 < 2,16	Las variables no están relacionadas

Fuente: (Elaboración propia).

De la figura se puede apreciar que en el año 2015 existe un pico máximo en el índice (INO) que corresponde al fuerte fenómeno del Niño ocurrido en la temporada 2015-2016. Este máximo corresponde a un decrecimiento en el rendimiento del cultivo. Las pruebas estadísticas de correlación confirman la existencia de una relación lineal positiva entre ambas variables según la Tabla 3-4, sin embargo, la porción de varianza del rendimiento explicada por el índice es del 44,72% lo que implica que el 55,28% del rendimiento restante podría ser explicado por otras causas.

3.3. Análisis de las series temporales de las variables meteorológicas

Con el fin de evaluar los posibles impactos de la variabilidad climática en el rendimiento de cultivo, se analizaron los comportamientos de las series temporales de las variables temperatura (máxima, mínima y media), precipitación, radiación solar y humedad. Adicionalmente y como característica del impacto de esta variabilidad en el suelo de cultivo tal como se mencionó en la introducción, se consideró la evapotranspiración.

Los datos utilizados fueron obtenidos de la estación meteorológica ESPOCH-INAMHI MA10 y corresponden a promedios mensuales para cada año del periodo 2002-2016. En la tabla a continuación (Tabla 3-5) se muestran los promedios anuales obtenidos a partir de los datos mensuales originales.

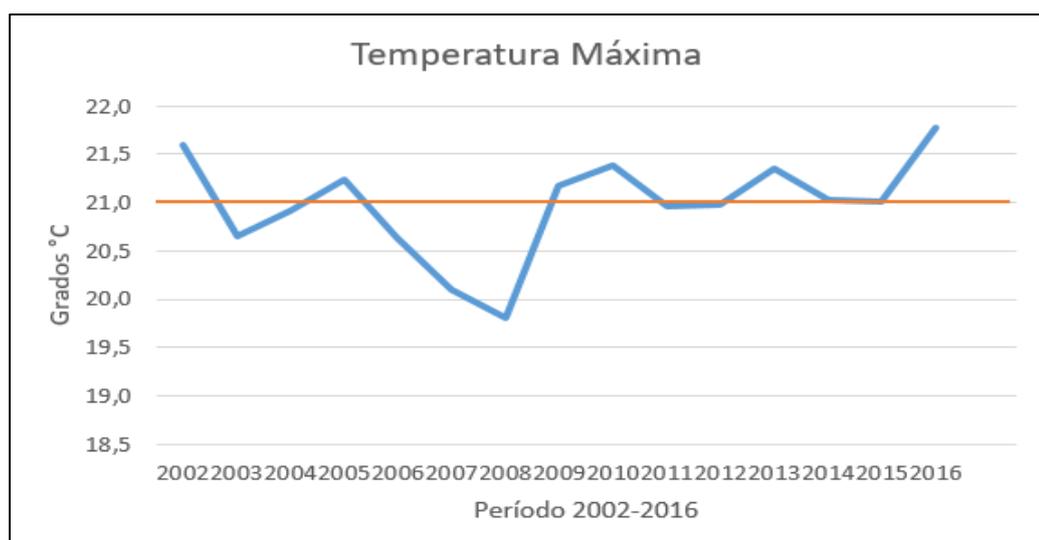
Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Tabla 3-5. Promedio anual para el periodo 2002-2016 de las variables meteorológicas en estudio.

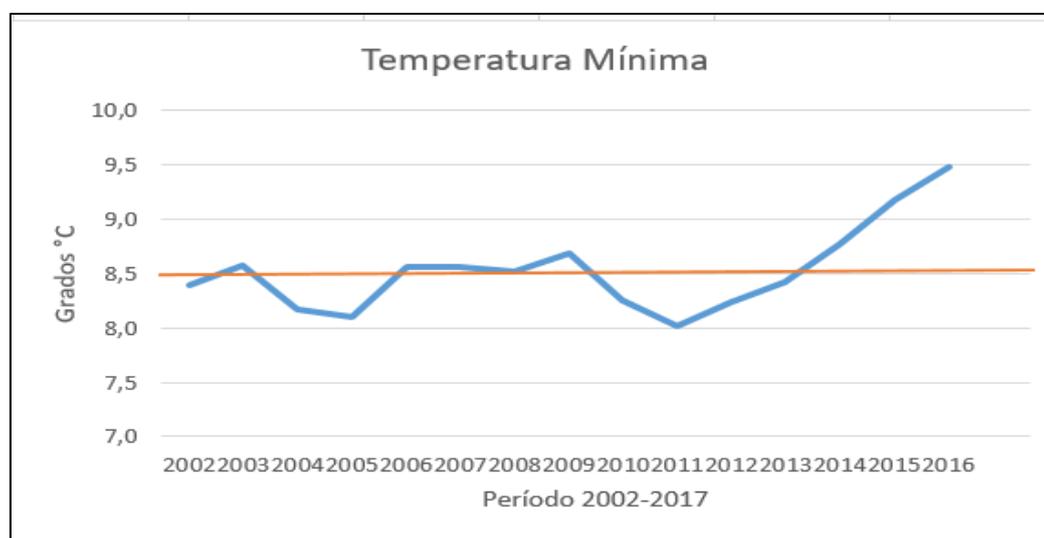
Año	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad (%)	Precipitación (mm/año)	Radiación Solar (%)	Evapotranspiración (mm/día)
2002	21,6	8,4	14,4	55,9	585,0	52,0	3,24
2003	20,7	8,6	13,5	60,8	370,4	44,1	3,24
2004	20,9	8,2	13,8	48,7	517,8	44,8	3,35
2005	21,2	8,1	14,1	60,5	508,0	45,8	3,43
2006	20,6	8,6	13,6	66,1	550,2	41,7	3,24
2007	20,1	8,6	13,4	66,9	622,2	41,7	3,15
2008	19,8	8,5	13,4	67,7	817,3	41,7	3,12
2009	21,2	8,7	14,1	65,8	363,3	45,5	3,35
2010	21,4	8,3	13,9	63,2	593,8	44,9	3,43
2011	21,0	8,0	13,4	62,8	722,4	46,3	3,34
2012	21,0	8,2	13,0	58,8	465,2	44,5	3,27
2013	21,4	8,4	13,6	60,9	385,4	45,5	3,36
2014	21,0	8,8	13,4	63,1	565,9	43,6	3,25
2015	21,0	9,2	13,4	72,7	475,3	44,7	3,20
2016	21,8	9,5	13,9	74,5	544,7	45,4	3,30
Desviación Estándar (σ)	0,49	0,38	0,35	6,83	129,81	2,55	0,092

Fuente: (INAMHI, 2016). Elaboración propia.

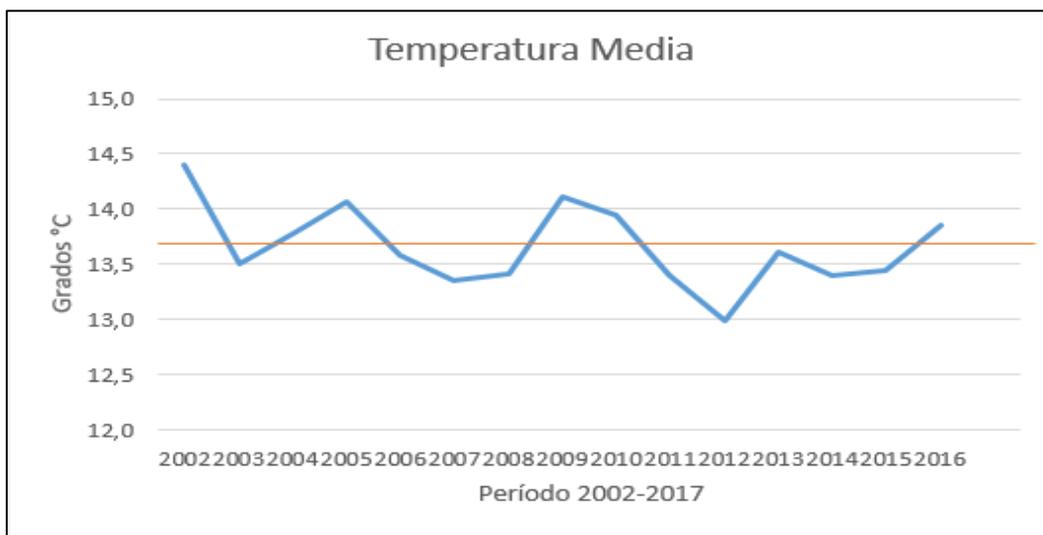
(a)



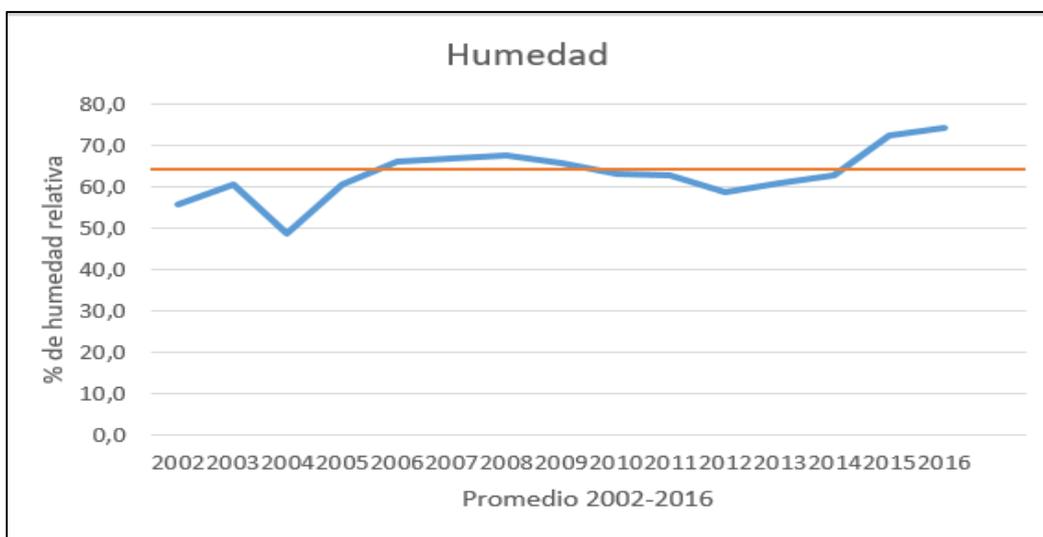
(b)



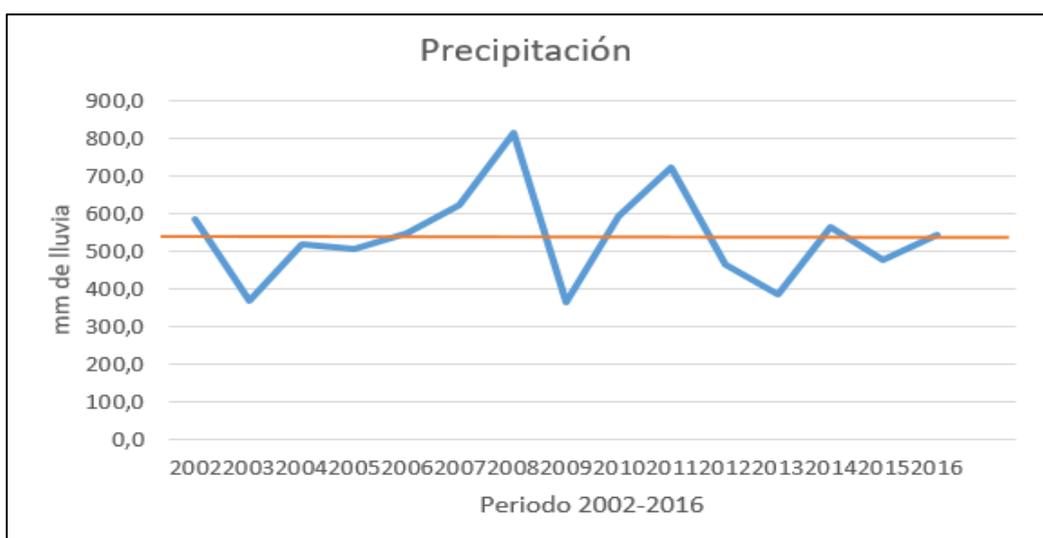
(c)



(d)

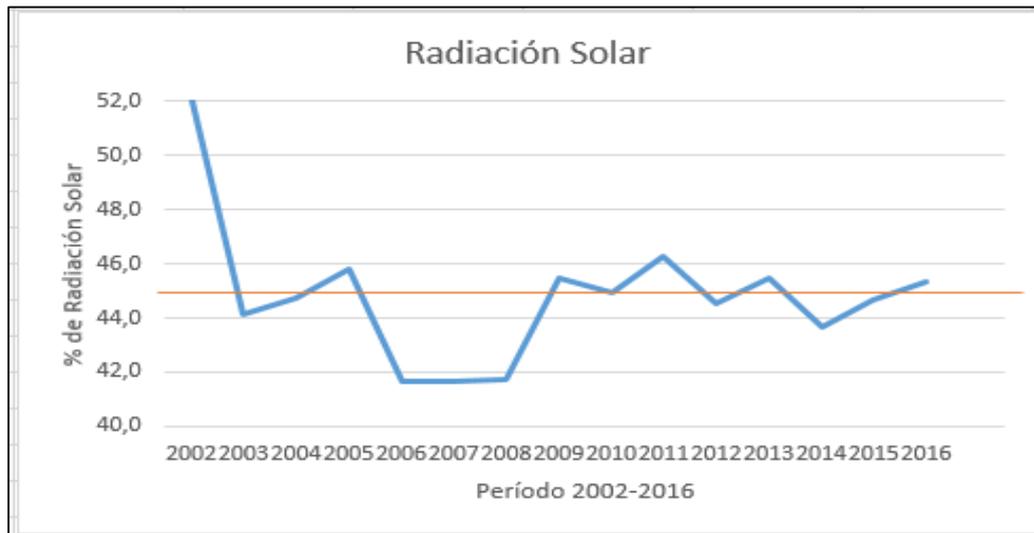


(e)



Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

(f)



(g)

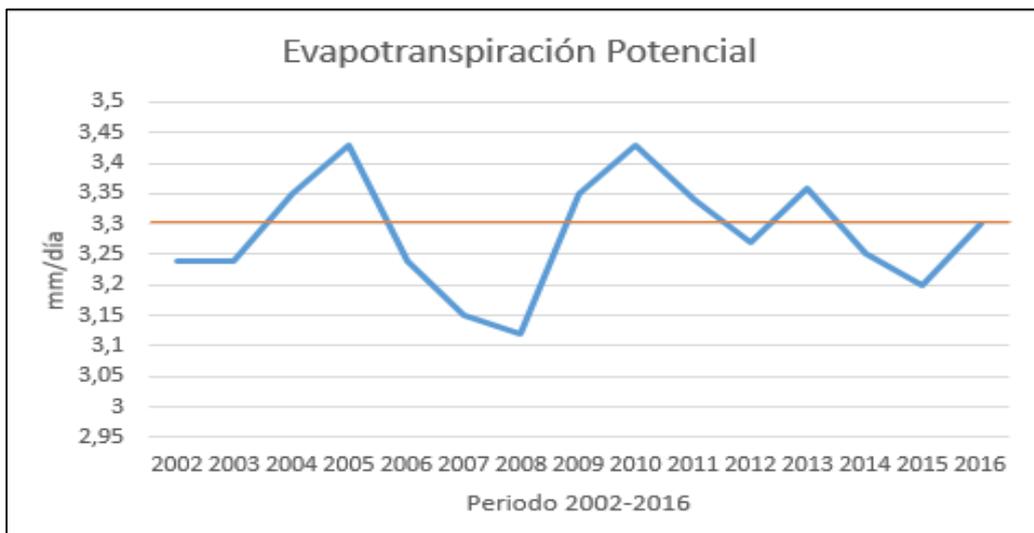


Figura 3-3. (a) Evolución de la temperatura máxima, (b) temperatura mínima en el cantón Riobamba, (c) temperatura media, (d) humedad, (e) precipitación, (f) la radiación solar y (g) evapotranspiración. **Fuente:** (Elaboración propia).

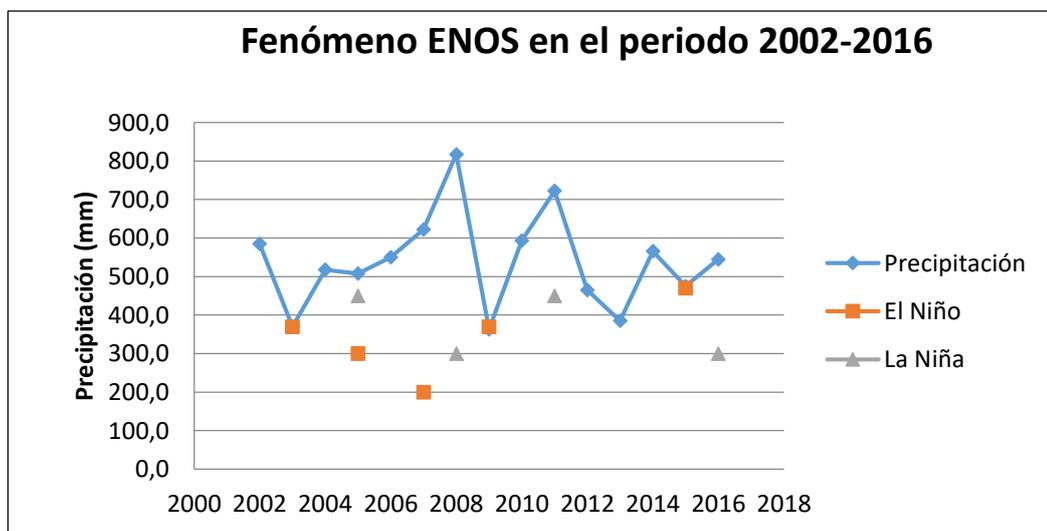


Figura 3-4. Ocurrencia del fenómeno ENOS en el periodo de tiempo 2002-2016. **Fuente:** (Elaboración propia).

La Figura 3-3 (a) muestra la media histórica de la temperatura máxima en °C el periodo 2002-2016. Su valor es 21 con una desviación estándar aproximada de 0.49. La variable tiene un comportamiento decreciente a partir del año 2002 hasta el 2008, momento el cual se aprecia un cambio de pendiente, siendo sus valores crecientes y alcanzando un máximo en el año 2015 con relación a la media histórica.

De manera análoga, en la Figura 3-3 (b) se aprecia que la temperatura mínima tiene con un valor promedio de 8,5 °C, y una desviación estándar cercana al 0.4. También en los últimos años del periodo se aprecia un crecimiento de los valores respecto a la media histórica.

Respecto a la temperatura media, la Figura 3-3 (c) muestra el comportamiento de la variable para el mismo periodo de interés que los casos anteriores. Como es de esperar a partir de las Figuras 3-3 (a) y (v) y 3-4, los valores de media histórica de la temperatura media (°C) en el cantón Riobamba para el periodo 2002-2016 presentan un comportamiento decreciente desde el inicio del periodo hasta el año 2012, momento a partir del cual hay un cambio de pendiente y los valores experimentan un crecimiento de aproximadamente 3.5 °C respecto a su mínimo. En promedio para todo el largo periodo es 13,7 (°C), y una desviación estándar igual a 0.35.

Respecto a la humedad, la media histórica expresada en % es 63,2 y su desviación estándar del orden de 6,8. Del gráfico se puede apreciar que la humedad en el cantón desde el año 2005 hasta el 2014 se mantenía cercana a la media, pero posterior al año 2014 aumenta.

En cuanto a las precipitaciones (Figura 3-3 d), se puede observar que la media histórica expresada en mm es 539,1, y posee una desviación estándar igual a 129,81. También se aprecia que, a lo largo del periodo de análisis, la variable presento fuertes picos tanto crecientes como decrecientes, correspondientes a períodos de mayor precipitación o sequía. Algunos de estos máximos y mínimos podrían estar fuertemente ligados al fenómeno ENOS, no obstante, a partir del año 2013 se puede observar una disminución en la frecuencia, y por ende una reducción en la media de las precipitaciones.

La Figura 3-4 muestra la ocurrencia del fenómeno del Niño y la Niña para el periodo 2002-2016 en relación con la precipitación en Riobamba. Se puede observar que los máximos y mínimos coinciden con eventos del Niño (mínimos) y la Niña (máximos). Este hecho concuerda con un estudio realizado por Hidalgo (2017) sobre la variabilidad climática en el Ecuador asociada al fenómeno ENOS, que concluye que en la región Andina del Ecuador ante la ocurrencia del fenómeno del Niño (cálido) las precipitaciones disminuyen y de manera contraria ante la ocurrencia del fenómeno de la Niña (frío) se evidencia un aumento en el promedio de las precipitaciones.

La radiación solar expresada en % muestra una media histórica de 44,8 (Figura 3-3 e) y una desviación de 2,55. A partir de la interpretación del gráfico se evidencia que a partir del año 2009

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

el valor de la variable es inferior a la media, acercándose los valores máximos a la misma, únicamente en el año 2011 se observa un aumento de la misma.

Finalmente, respecto a la evapotranspiración de referencia, la media histórica expresada en mm/día es 3,3 y su desviación estándar 0,092. Del gráfico podemos concluir que a partir del año 2011 el valor de la evapotranspiración es menor a la media; únicamente en el año 2013 se evidencia un aumento en el valor de la misma pudiéndose asociar a la disminución de precipitaciones para el mismo periodo de tiempo.

3.5. Correlación de las series temporales de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo del cultivo de papa

Una vez analizado el comportamiento de cada variable durante el período de estudio, se analizaron las posibles correlaciones entre cada una de ellas y el rendimiento del cultivo para poder estimar cuál(es) de ellas tienen un mayor impacto sobre el rendimiento. Para ello se realizaron pruebas estadísticas de correlación con varias funciones, covarianza y coeficiente de determinación. Los resultados para estas correlaciones figuran en las Tablas 3-7 a 3-13.

Adicionalmente los mejores ajustes de cada variable con el rendimiento se muestran en las Figuras 3-4 a 3-10. Los valores originales a partir de los cuales se analizaron las correlaciones son los que figuran en la siguiente (Tabla 3-6).

Tabla 3-6. Valores de las variables meteorológicas en estudio y del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Año	Rendimiento (Tm/Ha)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad (%)	Precipitación (mm/año)	Radiación Solar (%)	Evapotranspiración (mm/día)
2002	3,3	21,6	8,4	14,4	55,9	585,0	52,0	3,24
2003	5,3	20,7	8,6	13,5	60,8	370,4	44,1	3,24
2004	5,7	20,9	8,2	13,8	48,7	517,8	44,8	3,35
2005	4,1	21,2	8,1	14,1	60,5	508,0	45,8	3,43
2006	3,2	20,6	8,6	13,6	66,1	550,2	41,7	3,24
2007	4,0	20,1	8,6	13,4	66,9	622,2	41,7	3,15
2008	3,1	19,8	8,5	13,4	67,7	817,3	41,7	3,12
2009	3,5	21,2	8,7	14,1	65,8	363,3	45,5	3,35
2010	3,8	21,4	8,3	13,9	63,2	593,8	44,9	3,43
2011	4,3	21,0	8,0	13,4	62,8	722,4	46,3	3,34
2012	5,1	21,0	8,2	13,0	58,8	465,2	44,5	3,27
2013	5,4	21,4	8,4	13,6	60,9	385,4	45,5	3,36
2014	13,7	21,0	8,8	13,4	63,1	565,9	43,6	3,25
2015	11,2	21,0	9,2	13,4	72,7	475,3	44,7	3,20
2016	15,2	21,8	9,5	13,9	74,5	544,7	45,4	3,30

Fuente: (MAGAP, 2016; INAMHI, 2016).

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-7. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica temperatura máximo y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Temperatura máxima		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	0,75	Misma dirección
Correlación de Pearson (r)	0,36	Relación lineal positiva
Coefficiente de determinación (R ²)	0,13	Ajuste bajo del modelo

Fuente: (Elaboración propia).

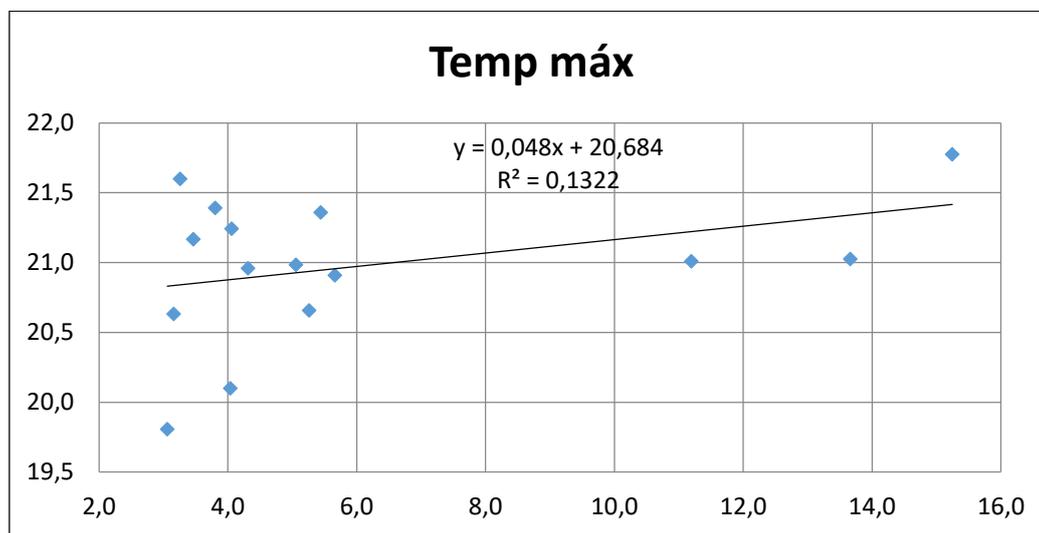


Figura 3-4. Correlación entre la temperatura máxima y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-8. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica temperatura mínima y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Temperatura mínima		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	1,19	Misma dirección
Correlación de Pearson (r)	0,76	Relación lineal fuerte positiva
Coefficiente de determinación (R ²)	0,58	Buen ajuste del modelo

Fuente: (Elaboración propia).

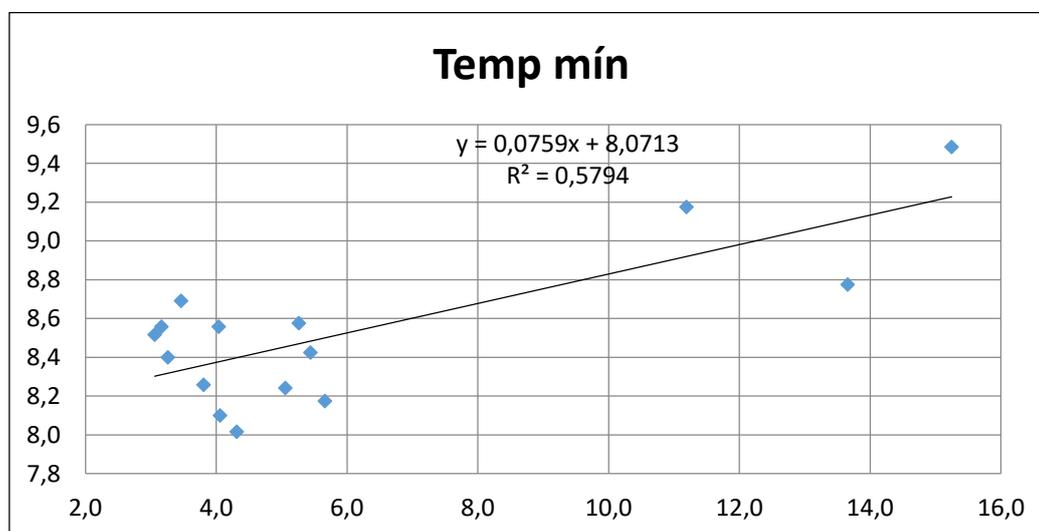


Figura 3-5. Correlación entre la temperatura mínima y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Tabla 3-9. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica temperatura media y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Temperatura media		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	-0,23	Dirección opuesta
Correlación de Pearson (r)	-0,16	Relación lineal negativa
Coefficiente de determinación (R ²)	0,025	Modelo poco idóneo

Fuente: (Elaboración propia).

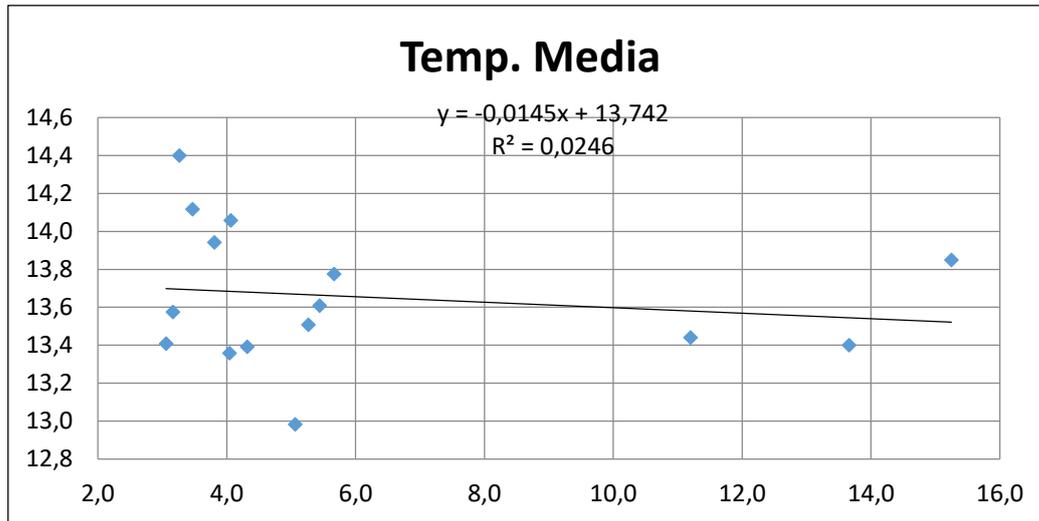


Figura 3-6. Correlación entre la temperatura media y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-10. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica humedad y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Humedad relativa		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	11,11	Misma dirección
Correlación de Pearson (r)	0,44	Relación lineal positiva
Coefficiente de determinación (R ²)	0,19	Ajuste bajo del modelo

Fuente (Elaboración propia).

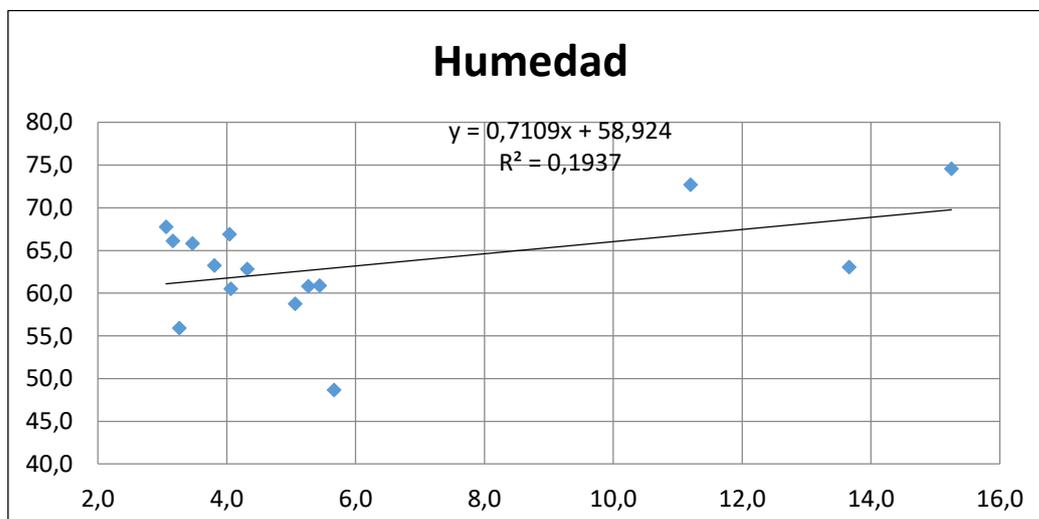


Figura 3-7. Correlación entre la humedad y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-11. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica precipitación y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Precipitación		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	-60,61	Dirección opuesta
Correlación de Pearson (r)	-0,12	Relación lineal débil negativa
Coefficiente de determinación (R ²)	0.015	Modelo poco idóneo

Fuente: (Elaboración propia).

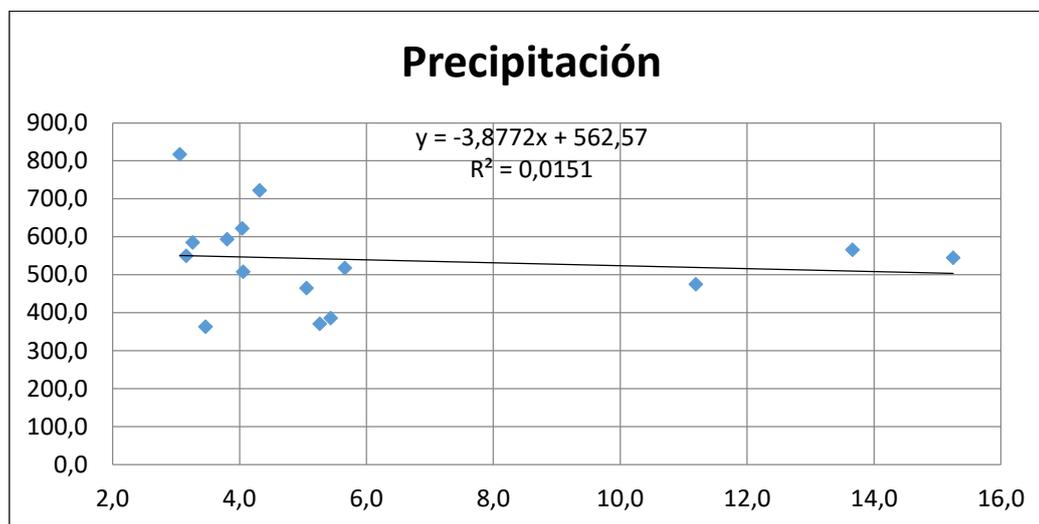


Figura 3-8. Correlación entre la precipitación y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-12. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica radiación solar y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Radiación Solar		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	-0,44	Dirección opuesta
Correlación de Pearson (r)	-0,045	Relación lineal negativa
Coefficiente de determinación (R ²)	0,0020	Modelo poco idóneo

Fuente: (Elaboración propia).

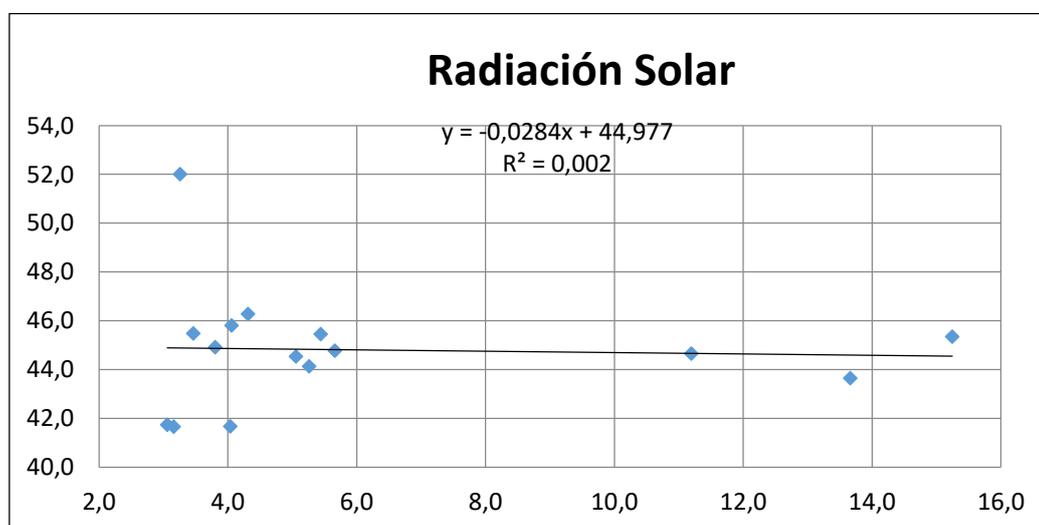


Figura 3-9. Correlación entre la radiación solar y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

Tabla 3-13. Resultados de las pruebas estadísticas de correlación entre la variable meteorológica evapotranspiración y el rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba.

Evapotranspiración		
Prueba Estadística	Resultado	Significado
Covarianza	-0,03	Dirección opuesta
Correlación de Pearson (r)	-0,87	Relación lineal negativa
Coefficiente de determinación (R ²)	0,0075	Modelo poco idóneo

Fuente: (Elaboración propia).

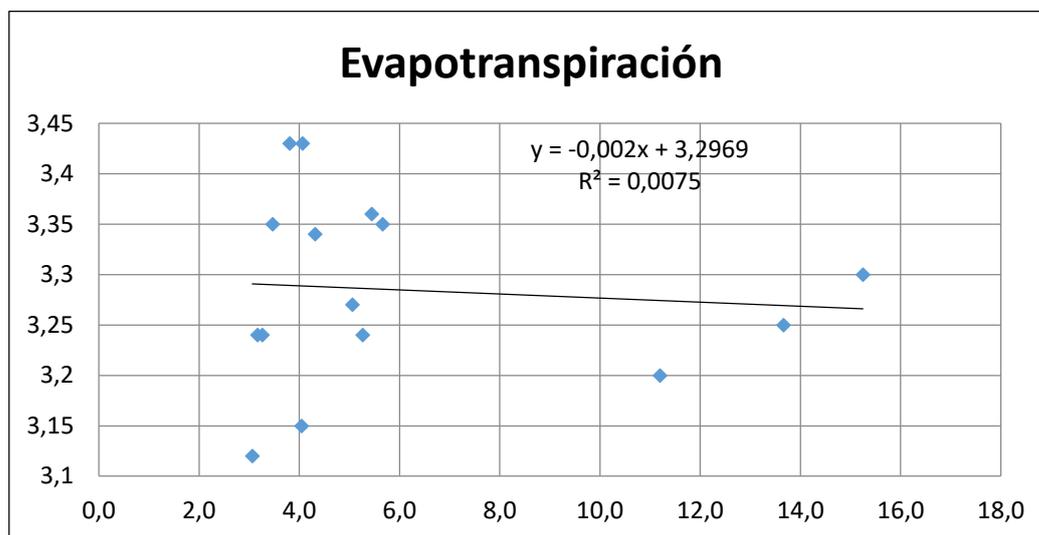


Figura 3-10. Correlación entre la evapotranspiración y el rendimiento.

Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-14. Índice de correlación de las variables meteorológicas con el rendimiento productivo.

Variables	Covarianza	Correlación de Pearson	Coefficiente de determinación
T. máxima	0,75	0,36	0,13
T. mínima	1,19	0,76	0,58
T. media	-0,23	-0,16	0,025
Humedad relativa	11,11	0,44	0,19
Precipitación	-60,11	-0,12	0,015
Radiación Solar	-0,44	-0,045	0,0020
Evapotranspiración	-0,03	-0,087	0,0075

Fuente: (Elaboración propia).

En todos los casos, aun cuando las correlaciones muestran una asociación baja entre las variables, la lineal fue la más representativa. De los resultados arriba expuestos y resumidos en la Tabla 3-14, se puede inferir que las variables con mayor correlación son la temperatura mínima y máxima, la humedad relativa y la evapotranspiración.

De las varianzas analizadas, el rendimiento explicado por la temperatura mínima equivale al 58%. Respecto a la temperatura mínima, el análisis sugiere que existe una relación lineal positiva media entre ambas variables y la porción de varianza compartida entre ambas variables equivale a 19%. Es decir, considerando las tres temperaturas, de las correlaciones surge que el rendimiento está

condicionado principalmente sólo por la temperatura mínima y lógicamente en menor medida por la media que es dependiente de la anterior.

Finalmente, la relación entre el cultivo y la evapotranspiración del suelo señala que la correlación es débil y opuesta, con una varianza compartida del orden del 0,75%.

Asumiendo que las variables analizadas pueden ser consideradas como independiente se realizó una correlación múltiple entre todas ellas y el rendimiento del cultivo para obtener una función que permita estimar su comportamiento. La ecuación (1) muestra la expresión matemática.

$$Y = -126,011 + 0,013 x_1 - 0,18 x_2 + 15,69 x_3 - 6,54 x_4 - 0,36 x_5 + 0,34 x_6 + 28,87 x_7. \quad (1)$$

Donde Y es el rendimiento, con x_1 precipitación, x_2 temperatura máxima, x_3 temperatura mínima, x_4 temperatura media, humedad x_5 , radiación solar x_6 y evapotranspiración potencial x_7 . De acuerdo con los valores que se muestran en la Tabla 3-15, esta ecuación representaría el comportamiento del rendimiento, en función de todas las variables, con un coeficiente de correlación de Pearson del orden del 0.95, y una varianza explicada del orden del 90%.

Tabla 3-15. Resumen de estadísticos descriptivos de la matriz de correlaciones múltiples.

RESUMEN	
Estadísticas	Resultados
Correlación de Pearson (r)	0,95
Coefficiente de determinación (R ²)	0,90
R ² ajustado	0,80
Error típico	1,75
Observaciones	15
Porción de varianza compartida entre variables y rendimiento (r)	90%
Rendimiento que queda por explicar (Coeficiente de no determinación).	10%

Fuente: (Elaboración propia).

Utilizando el índice de correlación descrito en la Tabla 3-15 obtenemos el porcentaje de contribución de cada variable meteorológica a la variación que puede sufrir el rendimiento del cultivo. Esta variación expresada en términos de porcentaje resulta ser el 1,51% para la precipitación, el 13,22% para la temperatura máxima, el 57,94% para la temperatura mínima, el 2,46 % para la media, el 19,37% para la humedad, el 0,20% para la radiación solar y finalmente el 0,75% para la evapotranspiración. La sumatoria total entonces es igual al 95% que coincide con el coeficiente de correlación de Pearson (r) y están muy próximo al coeficiente de determinación (R²) ambos descritos en la tabla 3-15.

3.6. Determinación del porcentaje de influencia de cada variable meteorológica

Otra forma de analizar el nivel de influencia de cada variable meteorológica en el rendimiento productivo del cultivo es utilizar el método estadístico Análisis de Componentes Principales (ACP). Por medio de este análisis se puede estudiar el nivel de interdependencia de las variables y reducir a un espacio de menor grado de libertad la dependencia del rendimiento respecto de las variables involucradas. En este caso, se utilizó el software XSTALT para este análisis y los resultados obtenidos se encuentran resumidos en las tablas y gráficos siguientes.

Tabla 3-16. Estadísticos descriptivos del análisis ACP.

Variable	Observaciones	Mínima	Máximo	Media	Desviación estándar
Rendimiento	15	3,1	15,3	6,0	4,0
T. máxima	15	19,8	21,8	21,0	0,5
T. mínima	15	8,0	9,5	8,5	0,4
T. media	15	13,0	14,4	13,7	0,4
Humedad relativa	15	48,7	74,5	63,2	6,4
Precipitación	15	363,3	817,3	539,1	124,7
Radiación Solar	15	41,7	52,0	44,8	2,5
Evapotranspiración	15	3,12	3,43	3,29	0,02

Fuente: (Elaboración propia).

La tabla 3-16 con los datos estadísticos descriptivos del análisis ACP, muestra que las variables meteorológicas temperatura máxima, mínima y media y evapotranspiración tienen valores de desviación estándar pequeños mientras que, por otro lado, la precipitación es la variable con la desviación más amplia y por ende, con los datos más dispersos; el rendimiento, la humedad y la radiación solar poseen una desviación estándar aceptable.

Tabla 3-17. Matriz de correlaciones (Pearson (n)) del rendimiento productivo del cultivo de papa y las variables meteorológicas en estudio.

Variables Meteorológicas	T.máxima	T.mínima	T.media	Humedad	Precipitación	Radiación solar	Evapotranspiración	Rendimiento
T.máxima	1	0,200	0,546	-0,072	-0,440	0,724	0,696	0,379
T.mínima	0,200	1	0,119	0,748	-0,208	-0,134	-0,286	0,755
T.media	0,546	0,119	1	-0,154	-0,131	0,650	0,369	-0,111
Humedad	-0,072	0,748	-0,154	1	0,142	-0,356	-0,331	0,430
Precipitación	-0,440	-0,208	-0,131	0,142	1	-0,151	-0,362	-0,135
Radiación solar	0,724	-0,134	0,650	-0,356	-0,151	1	0,355	-0,028
Evapotranspiración	0,696	-0,286	0,369	-0,331	-0,362	0,355	1	-0,031
Rendimiento	0,379	0,755	-0,111	0,430	-0,135	-0,028	-0,031	1

Fuente: (Elaboración propia).

La matriz de correlaciones derivada del ACP (Tabla 3-17) arroja en general resultados similares a los obtenidos en las pruebas de correlación realizadas individualmente con anterioridad entre el rendimiento productivo del cultivo y cada una de las variables meteorológicas en estudio y muestra que el rendimiento principalmente tiene una dependencia fuerte de la temperatura mínima y máxima, así como de la humedad.

El ACP también permite analizar la interdependencia de las variables meteorológicas involucradas. En este sentido, también de la Tabla 3-17, se puede apreciar que hay varias variables bien correlacionadas entre sí; por ejemplo, se observa que la evapotranspiración tiene una alta correlación positiva con la temperatura máxima y media, mientras la humedad está fuertemente ligada a la temperatura mínima.

Respecto de la radiación solar muestra una relación alta positiva con las temperaturas. Esta interdependencia entre variables sugiere que la regresión lineal podría tener una buena performance también sin considerar todo el universo de variables. Esto estaría indicando la posibilidad de obtener un ajuste lineal con alto grado de correlación sin incorporar todas las variables climáticas.

Para estudiar esto, se analizó nuevamente la regresión empleada en el ítem anterior, pero esta vez considerando la posibilidad de que la variable independiente, el rendimiento, pueda tener un grado de libertad variable, de uno a siete. Los resultados de este ajuste se muestran a continuación.

Tabla 3-18. Regresión lineal del Rendimiento en función de cantidad de variables.

Regresión de la variable Rendimiento:								
No. variables	VARIABLES	ME C	R ²	R ² ajustado	Cp Mallows	AIC Akaike	SBC Schwarz	PC Amemiya
2	Tmi/Tme	7,17	0,63	0,56	13,57	30,21	32,12	0,48
3	Tmáx/Tmi/Tme	5,42	0,75	0,67	8,82	26,95	29,51	0,38
4	Tmáx/Tmi/Tme/Precipitación	5,34	0,78	0,68	9,13	27,26	30,46	0,39
5	Tmáx/Tmi/Tme/Precipitación/Evapo	3,69	0,86	0,78	6,06	22,43	26,26	0,28
6	Tmi/Tm/Humedad/Precipitación/Rsolar/Evapo	3,17	0,96	0,81	6,07	20,45	24,92	0,24
7	Tmáx/Tmi/Tme/Humedad/Precipitación/Rsolar/Evapo	3,66	0,90	0,78	8,00	22,30	27,41	0,28

El mejor modelo para el criterio de selección seleccionado se muestra en azul.

Fuente: (Elaboración propia).

De los valores del ajuste que figuran en la Tabla 3-18, se aprecia que el mejor ajuste (resaltado en azul en la tabla) es aquél que considera seis variables: la temperatura mínima y media, la humedad, la precipitación junto con la radiación solar y la evapotranspiración. Este ajuste, con un valor de

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

coeficiente de determinación del orden del 0.96, propone entonces al rendimiento como una función lineal con la forma matemática expresada en la siguiente ecuación (2):

$$Y = -122.3 + 15.31 \times x_3 - 7.32 \times x_4 - 0.36 \times x_5 + 0.00315 \times x_1 + 0.417 \times x_6 + 28.8 \times x_7 \quad (2)$$

Siendo Y el rendimiento, x_1 precipitación, x_2 temperatura máxima, x_3 temperatura mínima, x_4 temperatura media, humedad x_5 , radiación solar x_6 y evapotranspiración x_7 .

En forma gráfica, los resultados de este ajuste se pueden ver en la Figura 3-11, donde se muestra la contribución de cada variable al rendimiento con los coeficientes estandarizados.

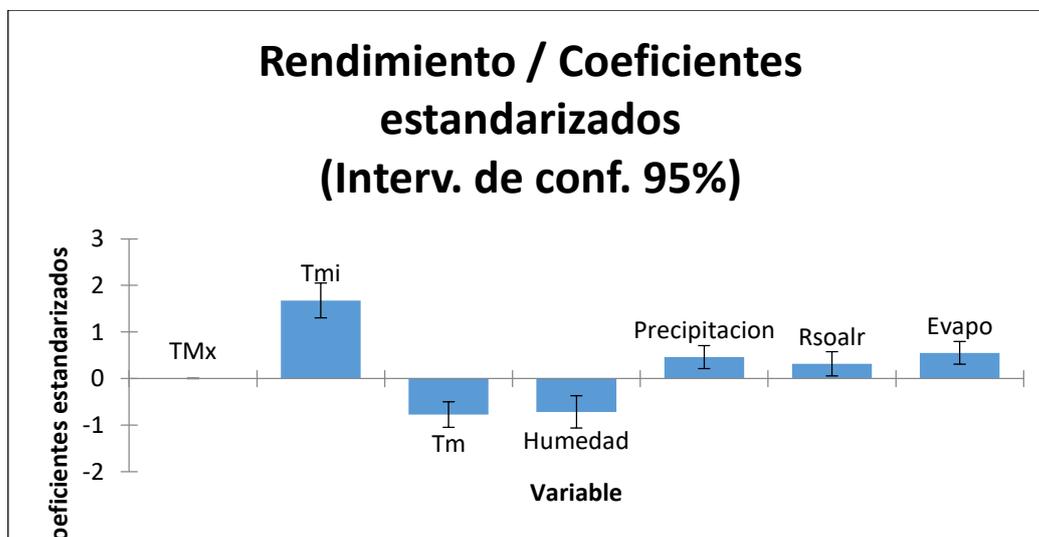


Figura 3-11. Contribución de las variables meteorológicas con coeficientes estandarizados al rendimiento del cultivo.

Fuente: (Elaboración propia).

Del ACP se obtuvo además en este caso el rendimiento en función de tres componentes principales. La Figura 3-12 muestra el gráfico de sedimentación en donde se puede apreciar que las primeras dos componentes explican la mayor varianza del conjunto de datos. Si adicionalmente se le suma la componente F3, la varianza explicada alcanza el 80%, como muestra la última fila resaltada en azul (Tabla 3-19).

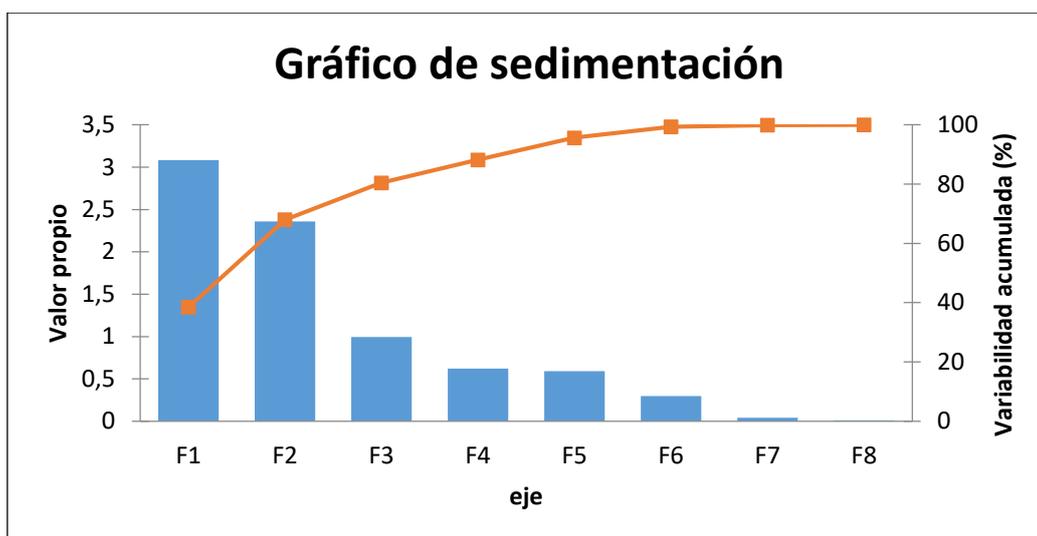


Figura 3-12. Gráfico de Sedimentación de componentes principales.
Fuente: (Elaboración propia).

Estos resultados están además mostrados en las Tablas 3-19 y 3-20.

Tabla 3-19. Valores propios del análisis de componentes principales.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valor propio	3,08	2,36	0,99	0,62	0,59	0,30	0,04	0,01
Variabilidad (%)	38,52	29,50	12,43	7,78	7,40	3,72	0,52	0,14
% acumulado	38,52	68,02	80,45	88,23	95,63	99,35	99,86	100,00

Fuente: (Elaboración propia).

La Tabla 3-20, muestra los restantes resultados derivados del ACP. En el apartado (a) se observan los auto vectores correspondientes a cada componente y en el (b) las correlaciones entre cada factor y las variables. En este punto hay que destacar que la componente F2 es la que tiene la mayor contribución del rendimiento y por tanto la que explica la mayor variabilidad de esta variable; las otras contribuciones importantes corresponden a la temperatura mínima y la humedad, que son justamente las variables mejor correlacionadas con el rendimiento en el análisis anterior que figura en la Tabla 3-17. Finalmente, el ítem (c) muestra estas mismas contribuciones en tanto por ciento.

Tabla 3-20. Resultados del Análisis de Componentes Principales.

(a) Vectores propios	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Rendimiento	-0,12	0,55	-0,09	0,50	-0,24	-0,39	-0,41	-0,22
T.Máx	0,44	0,38	0,00	0,25	0,00	0,26	0,63	-0,38
T.Min	-0,23	0,57	0,08	-0,26	-0,05	-0,18	0,37	0,62
T.Med	0,41	0,12	0,46	-0,45	0,25	-0,51	-0,13	-0,27
Humedad	-0,33	0,39	0,20	-0,12	0,52	0,54	-0,29	-0,18
Precipitación	-0,23	-0,23	0,71	0,54	0,16	-0,11	0,21	0,11
R.solar	0,46	0,10	0,39	0,02	-0,46	0,43	-0,36	0,33
Evapotranspiración	0,45	0,02	-0,27	0,34	0,61	-0,08	-0,16	0,45

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

(b) Correlaciones entre las variables y los factores	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Rendimiento	-0,21	0,84	-0,09	0,40	-0,19	-0,21	-0,08	-0,02
T.Máx	0,77	0,58	0,00	0,19	0,00	0,14	0,13	-0,04
T.Min	-0,40	0,88	0,08	-0,20	-0,04	-0,10	0,07	0,06
T.Med	0,72	0,19	0,46	-0,35	0,19	-0,28	-0,03	-0,03
Humedad	-0,58	0,60	0,20	-0,10	0,40	0,30	-0,06	-0,02
Precipitación	-0,41	-0,36	0,71	0,42	0,12	-0,06	0,04	0,01
R.solar	0,80	0,16	0,39	0,01	-0,36	0,23	-0,07	0,03
Evapotranspiración	0,79	0,03	-0,27	0,27	0,47	-0,04	-0,03	0,05

(c) Contribuciones de las variables (%)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Rendimiento	1,46	29,78	0,78	25,34	5,97	14,85	16,87	4,97
T.Máx	19,22	14,06	0,00	6,02	0,00	6,90	39,42	14,38
T.Min	5,09	32,80	0,70	6,58	0,29	3,36	13,32	37,86
T.Med	16,77	1,50	20,97	20,13	6,00	25,85	1,70	7,07
Humedad	10,99	15,30	4,07	1,53	26,99	29,14	8,60	3,40
Precipitación	5,34	5,48	51,03	28,74	2,39	1,25	4,46	1,31
R.solar	20,69	1,04	15,13	0,03	21,45	18,07	12,99	10,61
Evapotranspiración	20,45	0,05	7,32	11,63	36,91	0,60	2,65	20,40

Este resultado queda más evidentemente plasmado en el gráfico de la Figura 3-13. En esta figura se considera sólo los dos componentes de mayor peso en el análisis y muestra cómo vector del rendimiento del cultivo está en el mismo cuadrante y muy próximo a las variables más altamente correlacionadas positivas con él. En este caso estas variables son como mencionamos antes la humedad y la temperatura mínima. Los vectores que se encuentran en los restantes cuadrantes implican correlaciones medias o altas pero negativas (segundo cuadrante) mientras que los cuadrantes tres y cuatro son correlaciones bajas, positivas y negativas respectivamente.

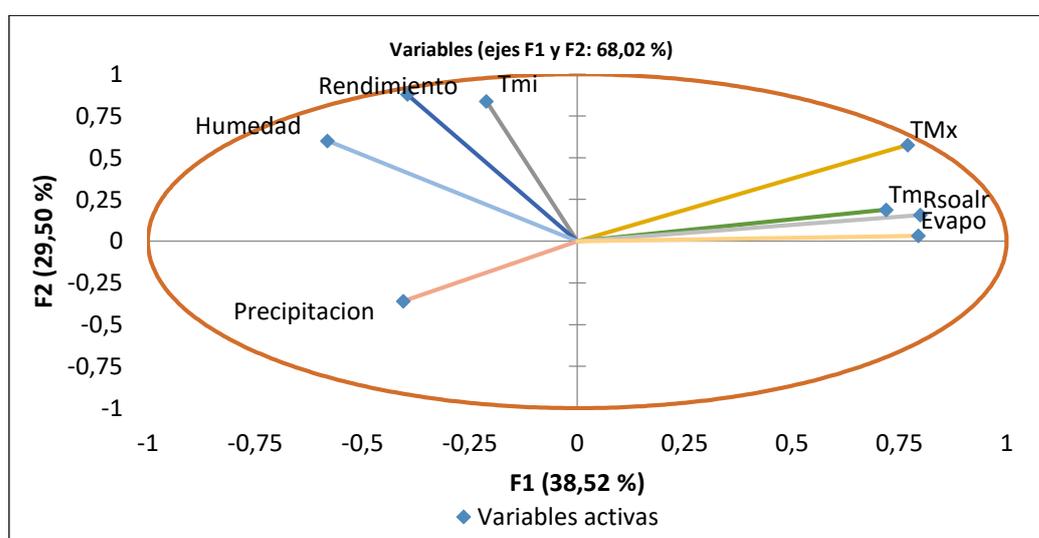


Figura 3-13. Gráfico de Componentes Principales.

Fuente: (Elaboración propia).

De la Tabla 3-20 (a) se puede analizar también la correlación del rendimiento y las otras variables, así como su comportamiento. En el caso de F1, que explica la mayor variabilidad del rendimiento con un 38,52%, se puede observar que a medida que el rendimiento crece, lo hacen las restantes variables a excepción de la precipitación. Esto es lo mismo que decir que el rendimiento y la precipitación tienen una correlación opuesta que es lo que muestra también la Figura 3-13. De forma análoga podemos considerar la componente F2. En este caso, a medida que decrece el rendimiento, decrecen también la temperatura mínima, la humedad y la precipitación, pero crecen las restantes.

Sin embargo, de los autovalores también se puede extraer más información respecto a la evolución temporal del rendimiento. Por medio del producto escalar entre los autovalores de las componentes principales y los valores de las variables analizadas estandarizadas (para eliminar la diferencia de unidades), podemos reconstruir la evolución temporal de cada una de las componentes principales a lo largo del período de estudio. Las que interesan principalmente son F1 y F2 que explican la mayor varianza del conjunto analizado. Una vez analizado el comportamiento temporal de las componentes es factible hipotetizar sobre la evolución del rendimiento. La Figuras 3-14 y 3-15 muestran la evolución temporal de la componente F1 y F2.

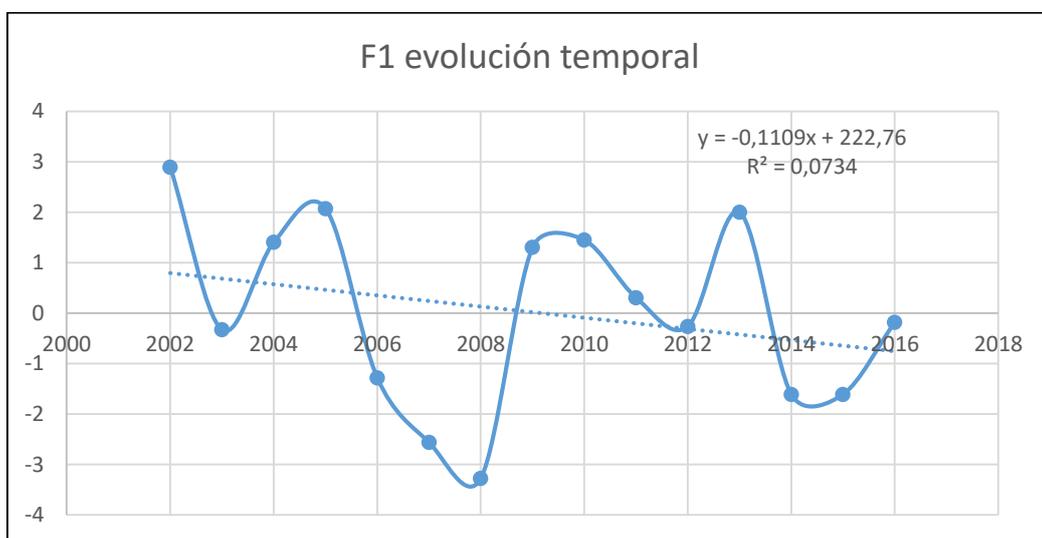


Figura 3-14. Evolución temporal de la componente F1.
Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

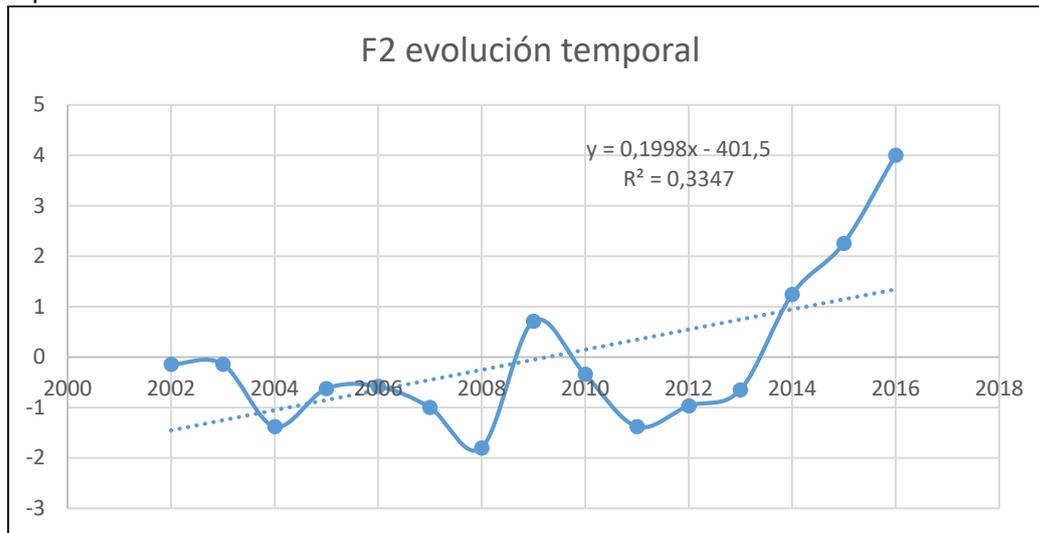


Figura 3-15. Evolución temporal de la componente F2.
Fuente: (Elaboración propia).

En la evolución temporal de cada una de las dos componentes, si bien es cierto que no se les puede atribuir un comportamiento definido ya que sus valores oscilan, si se puede distinguir la tendencia en cada pendiente. En el caso de F2, la pendiente es positiva indicando, en decir, hay tendencia a que la componente crezca, por lo tanto si F2 crece, según la Tabla 3-20 (a), todas las variables tienden a aumentar, incluida el rendimiento, mientras la precipitación tiene a disminuir, tal como se pudo observar en los resultados previos. En forma complementaria, la tendencia de la componente F1 es de decrecimiento, por ende, según la misma Tabla también el rendimiento tiene expectativas de crecimiento. En ambos casos se obtienen resultados similares al análisis anterior.

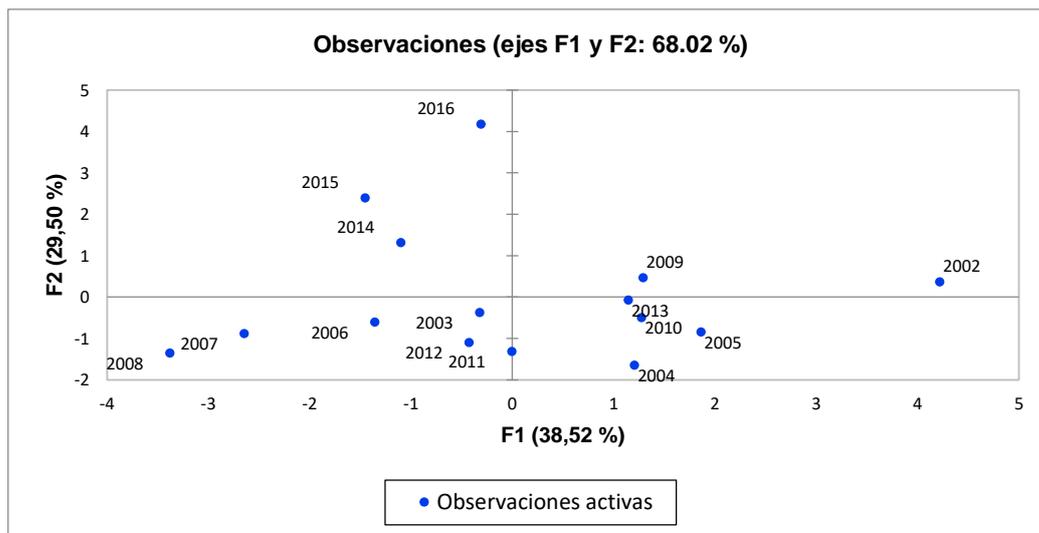


Figura 3-16. Observaciones activas de la serie temporal 2002-2016
Fuente: (Elaboración propia).

Si el mismo análisis de componentes se realiza nuevamente, pero considerando ahora la evolución año a año de las componentes, se obtienen las figuras 3-16 y 3-17. De manera análoga el eje horizontal es la primera dimensión del análisis ACP representado por F1 que contiene 38,52% de la información inicial, mientras que el eje vertical es la segunda dimensión del análisis ACP representado por F2 que contiene el 29,50% de los valores.

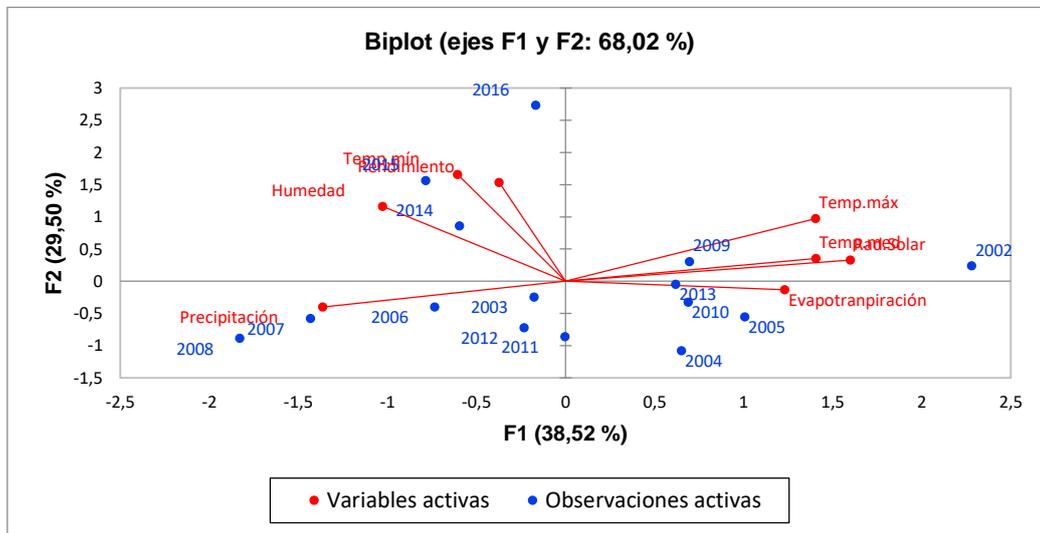


Figura 3-17. Biplot del rendimiento del cultivo con las variables meteorológicas en estudio.
Fuente: (Elaboración propia).

De ambas figuras se puede inferir que la correlación entre el rendimiento, la temperatura mínima y la humedad se dieron especialmente en el período comprendido entre los años 2014 a 2016 mientras que la precipitación tiene un sentido contrario al rendimiento para la mayor parte de los años analizados. La correlación débil hallada anteriormente considerando valores medios de las variables para la temperatura máxima, temperatura media, radiación solar y evapotranspiración mantiene su tendencia cuando el análisis se hace discriminando año a año.

3.7. Proyecciones de escenarios climáticos futuros

Las proyecciones de escenarios climáticos futuros fueron realizadas para las todas variables meteorológicas hasta aquí estudiadas y se construyeron a partir de promedios mensuales y anuales para el periodo 2002-2016 por medio del ARIMA. Se consideraron proyecciones mensuales y anuales y aun cuando el objetivo del análisis se basa el pronóstico de comportamiento hasta el 2020, las proyecciones se realizaron hasta el 2050 inclusive para corroborar las tendencias. Los valores numéricos de las proyecciones hasta el 2020 de todas las variables se volcaron en la Tabla 3-21. En todos los casos se consideró un margen de confianza del orden del 95%.

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

La figura 3-18 muestra la tendencia de la temperatura máxima hasta el año 2050 y fue construida en base al promedio anual del periodo 2002-2017. La variable muestra una clara tendencia creciente de la variable que también se puede apreciar en la figura 3-19, donde están representados los valores reales mensuales para el periodo 2002-2017 de la variable en azul, la proyección del modelo ARIMA en rojo para el mismo periodo de tiempo, la validación del modelo en color naranja y la predicción para el año 2020 en color verde. Aplicando la prueba estadística de Mann-Kendall para determinar si existe una tendencia estacional en la variable se obtuvo como resultado que el valor de p es $<0,0001$, y dado que el valor de p es menor que el nivel de significancia (0,05), por lo tanto, se puede concluir que existe una tendencia anual en la serie de la variable. Finalmente, la Figura 3-20 representa la serie temporal 2002-2020 para la variable temperatura máxima.

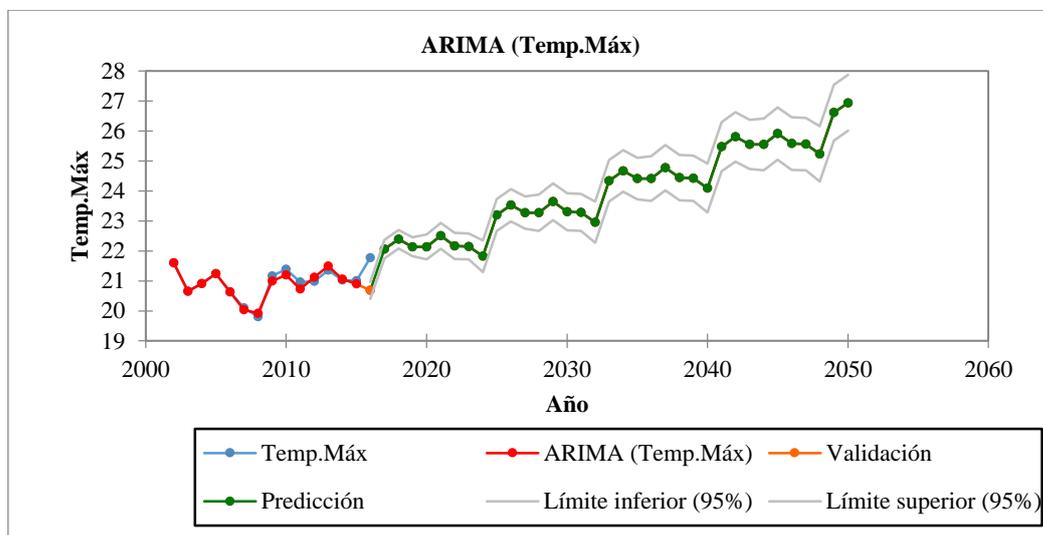


Figura 3-18. Proyección de la temperatura máxima para el año 2050.
Fuente: (Elaboración propia).

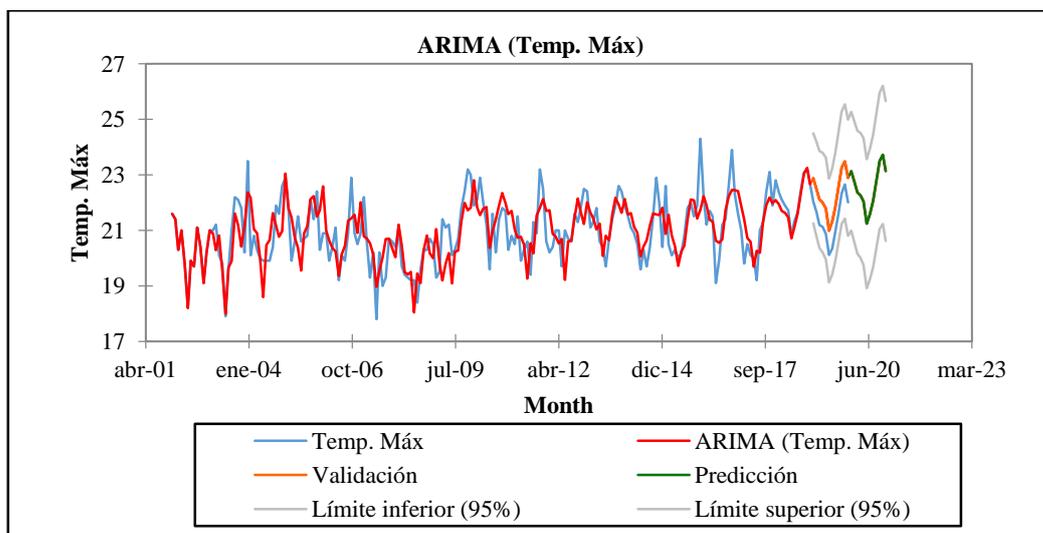


Figura 3-19. Proyección de la temperatura máxima para el año 2020.
Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-21. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable temperatura máxima.

Tau de Kendall	0,34
S'	698
Var (S')	9760,67
Valor-p	<0,0001
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0,085

Fuente: (Elaboración propia).

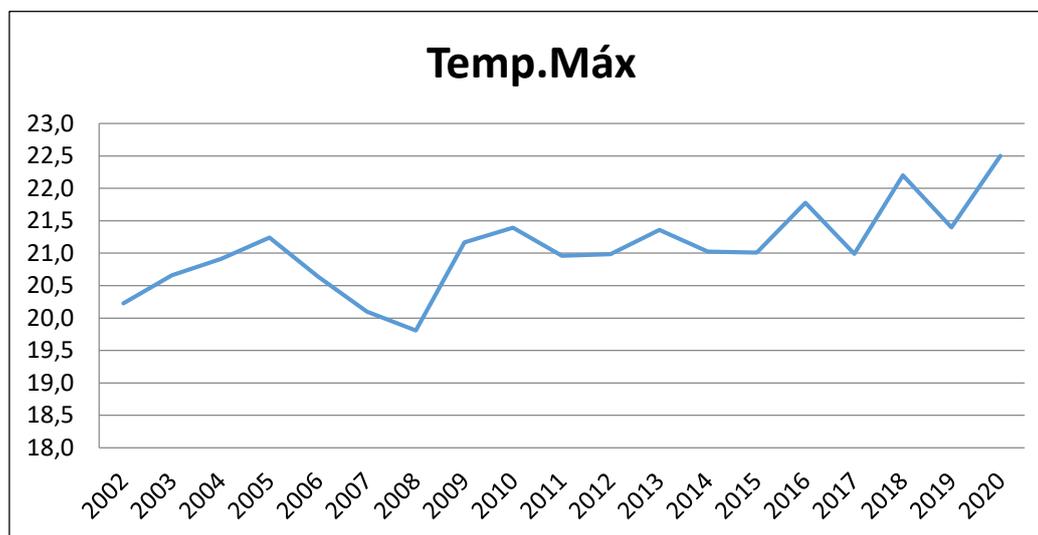


Figura 3-20. Evolución de la temperatura máxima periodo 2002-2020.

Fuente: (Elaboración propia).

El mismo procedimiento se empleó con las restantes variables. Para el caso de la temperatura mínima las Figuras 3-22 y 3-23 muestran la tendencia de la variable hasta el 2050 y particularmente hasta el 2020. También en este caso se aprecia que el comportamiento de la variable es creciente para el periodo 2018 a 2020 (Figura 3-23). En general el método utilizado parecería reproducir la tendencia de los últimos 3 años registrados en la base de datos del software, razón por la cual se recomienda que el modelo ARIMA solamente puede ser utilizado para proyecciones de lapsos cortos de tiempo. La existencia de la tendencia se puede corroborar además por los valores del test Mann-Kendall (Tabla 3-22).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

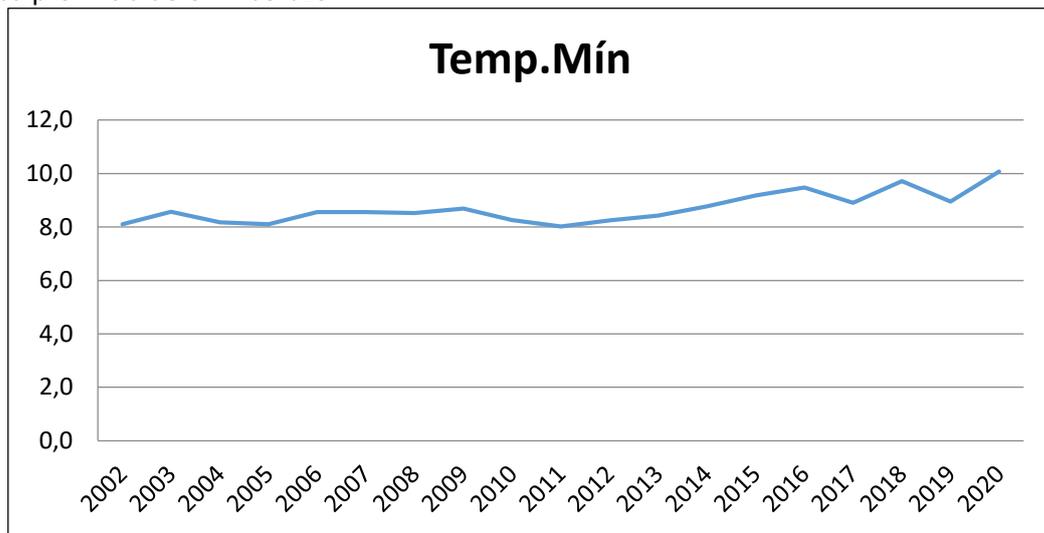


Figura 3-21. Evolución de la temperatura mínima periodo 2002-2020.
Fuente: (Elaboración propia).

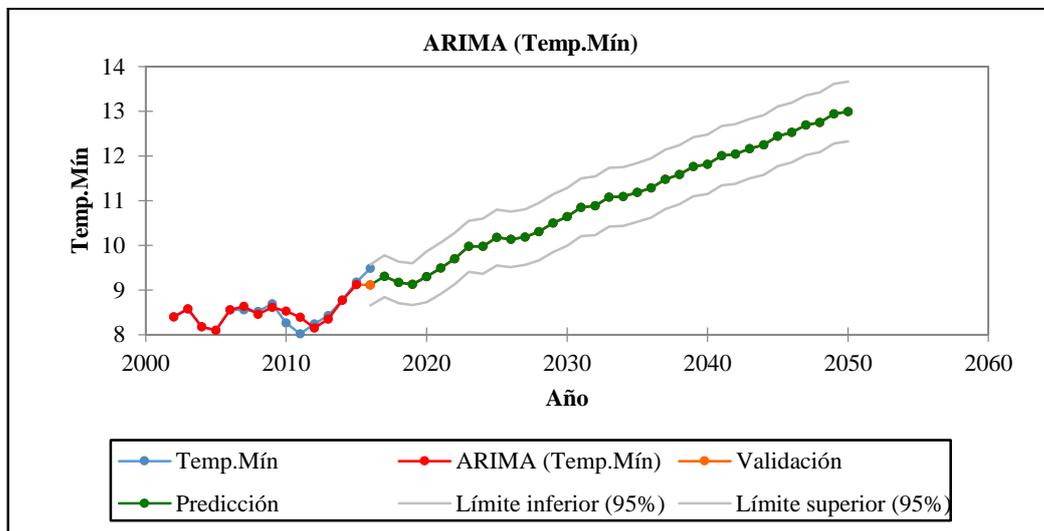


Figura 3-22. Proyección de la temperatura mínima para el año 2050.
Fuente: (Elaboración propia).

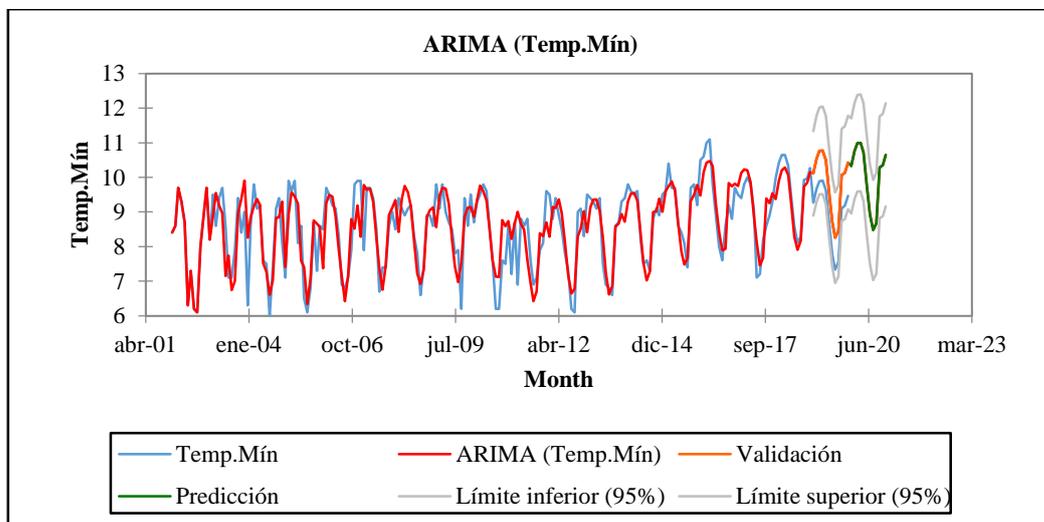


Figura 3-23. Proyección de la temperatura mínima para el año 2020.
Fuente: (Elaboración propia).

Tabla 3-22. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable temperatura mínima.

Tau de Kendall	0,40
S'	812
Var (S')	9725,33
Valor-p	<0,0001
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0,073

Fuente: (Elaboración propia).

Respecto de la proyección para la temperatura media, las proyecciones sugieren un comportamiento que oscila sin una marcada tendencia y con valores de dispersión altos tanto para las proyecciones hasta el 2020 como hasta el 2050 (Figuras 3-24, 3-25 y 3-26).

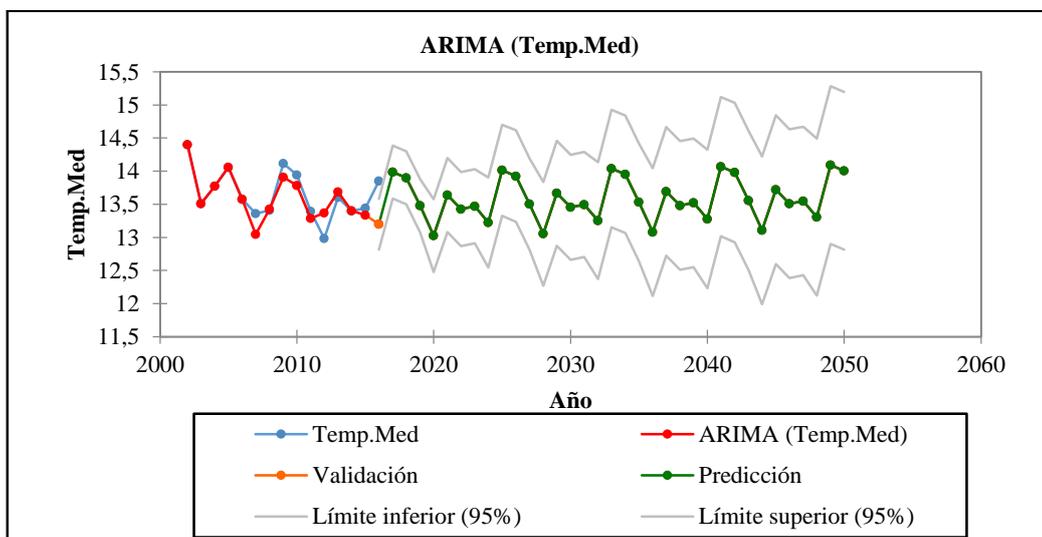


Figura 3-24. Proyección de la temperatura media para el año 2050.

Fuente: (Elaboración propia).

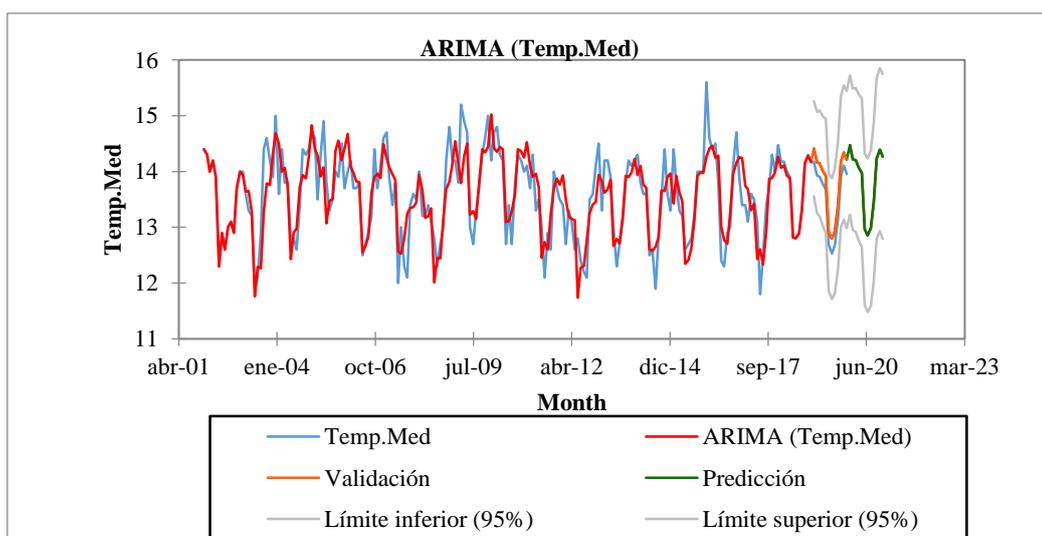


Figura 3-25. Proyección de la temperatura media para el año 2020.

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

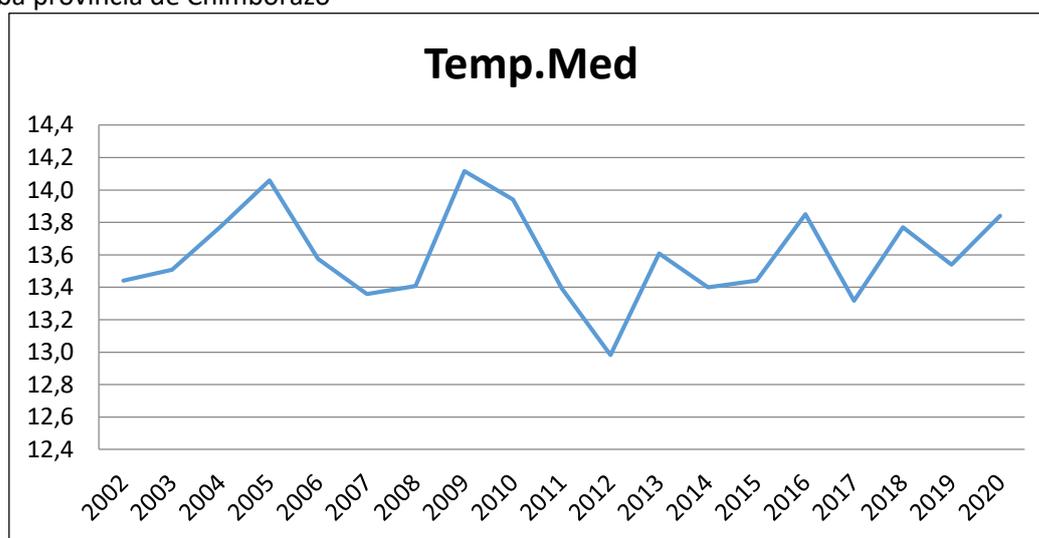


Figura 3-26. Evolución de la temperatura media periodo 2002-2020.

Fuente: (Elaboración propia).

Si se aplica el test de Mann-Kendall para esta variable se observa nuevamente que no existe una tendencia en la serie que puede estar explicada al menos parcialmente en el hecho de que los valores de la temperatura media son el promedio de la temperatura máxima y mínima, por lo tanto el valor de la variable no depende de sí misma (Tabla 3-23).

Tabla 3-23. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable temperatura media.

Tau de Kendall	0,009
S'	19
Var (S')	9713,67
Valor-p	0,85
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0

Fuente: (Elaboración propia).

En cuanto a la humedad relativa el estudio muestra una variable en constante aumento durante el periodo de tiempo 2002-2020 y una proyección que sigue la misma tanto hasta el 2050 (Figuras 3-27 y 3-28). En particular en este caso cabe destacar que en la Figura 3-28 se observa que el ajuste del modelo real (azul) con la proyección ARIMA (rojo) es muy buena, sin embargo, la validación del modelo (naranja) es un poco distante del modelo real y la proyección (verde) sigue esta misma tendencia), por lo que se puede estimar que el valor final de la proyección está algo sobreestimado. Los valores estimados hasta el 2020 se muestran en la Figura 3-29.

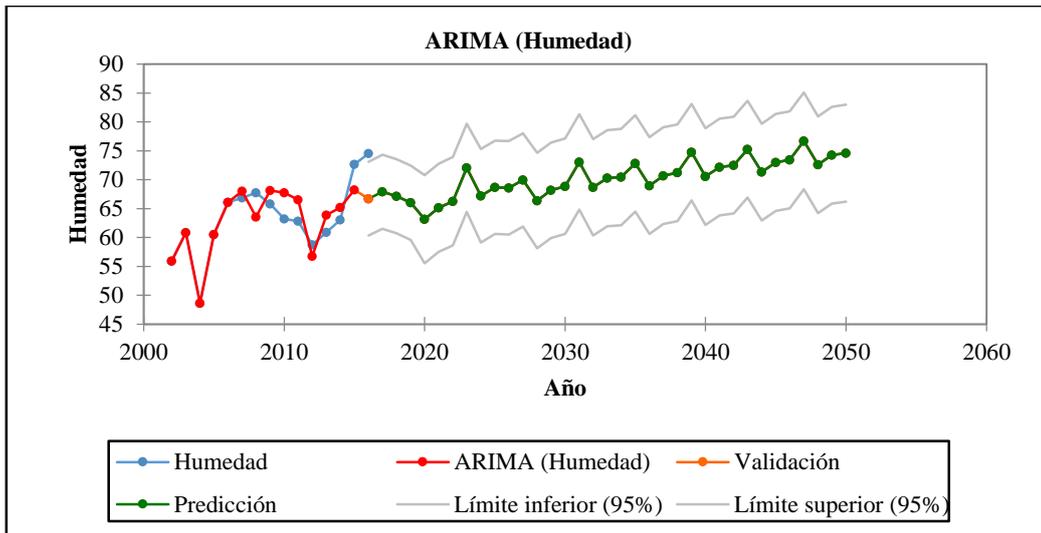


Figura 3-27. Proyección de la humedad relativa para el año 2050.
Fuente: (Elaboración propia).

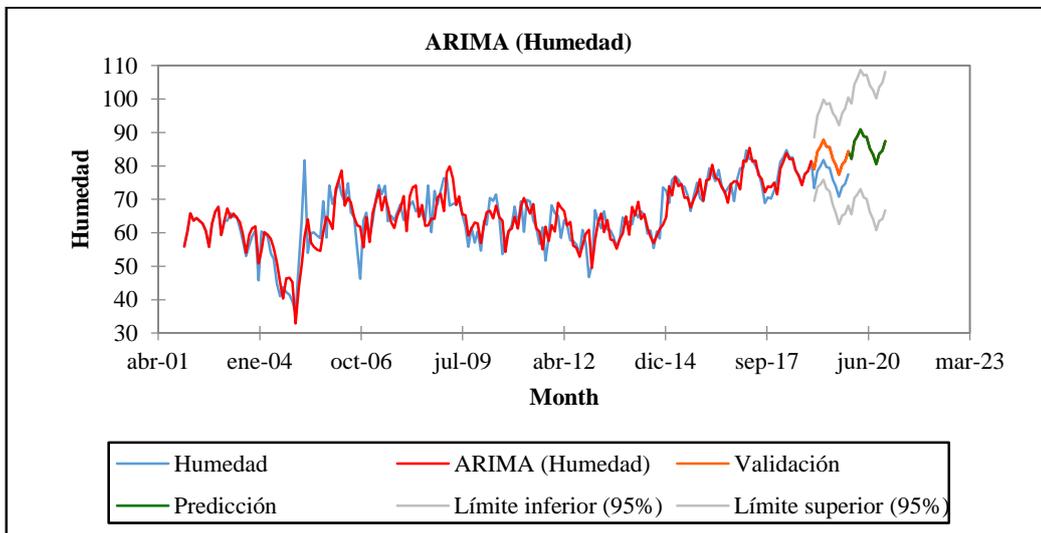


Figura 3-28. Proyección de la humedad relativa para el año 2020.
Fuente: (Elaboración propia).

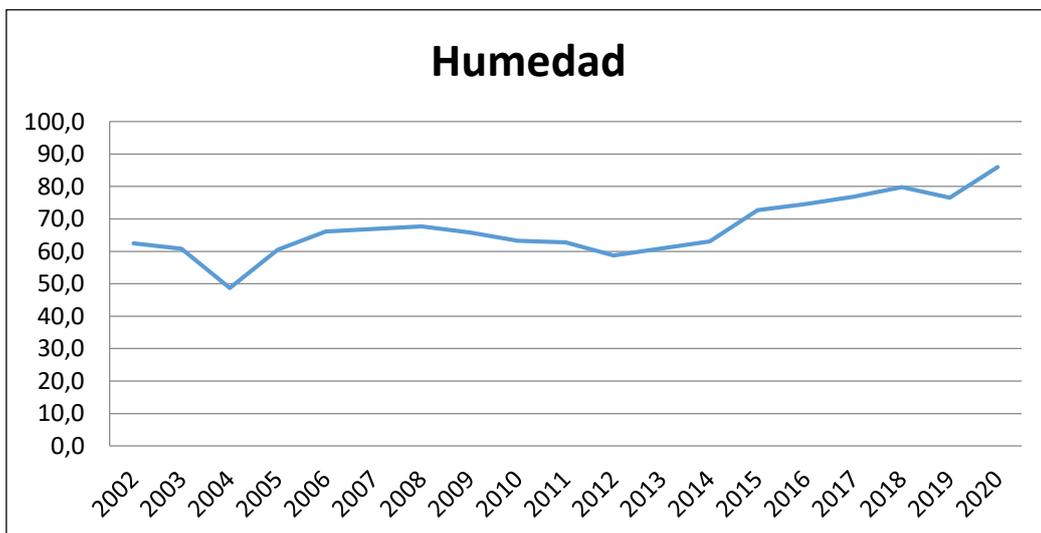


Figura 3-29. Evolución de la humedad relativa periodo 2002-2020.
Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

De la prueba estadística de Mann-Kendall (Tabla 3-24) el valor de p para la humedad relativa resultó ser $< 0,0001$ se puede concluir que existe una tendencia en la serie.

Tabla 3-24. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable humedad.

Tau de Kendall	0,50
S'	10220
Var (S')	9794,67
Valor-p	$< 0,0001$
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	1,22

Fuente: (Elaboración propia).

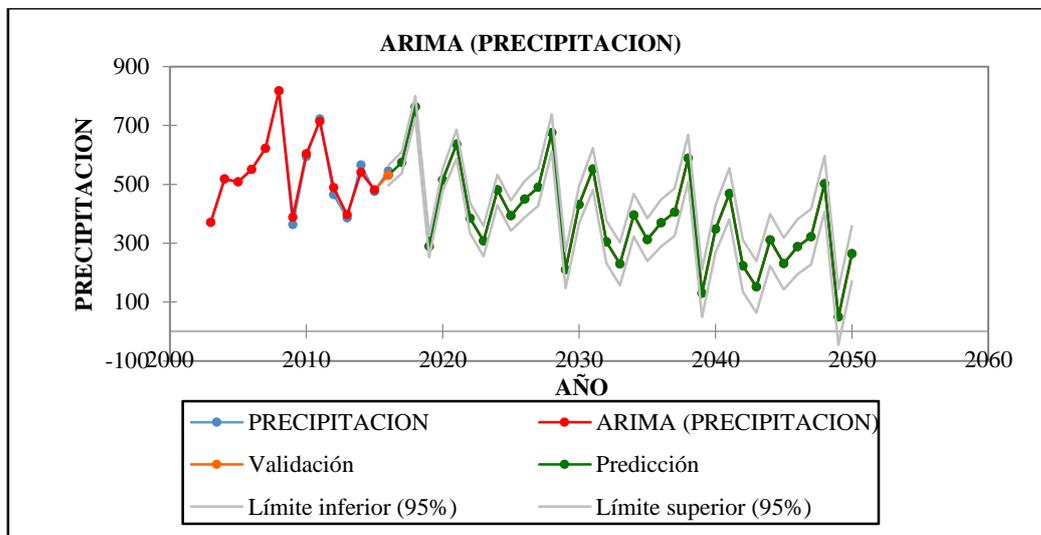


Figura 3-30. Proyección de la precipitación para el año 2050.

Fuente: (Elaboración propia).

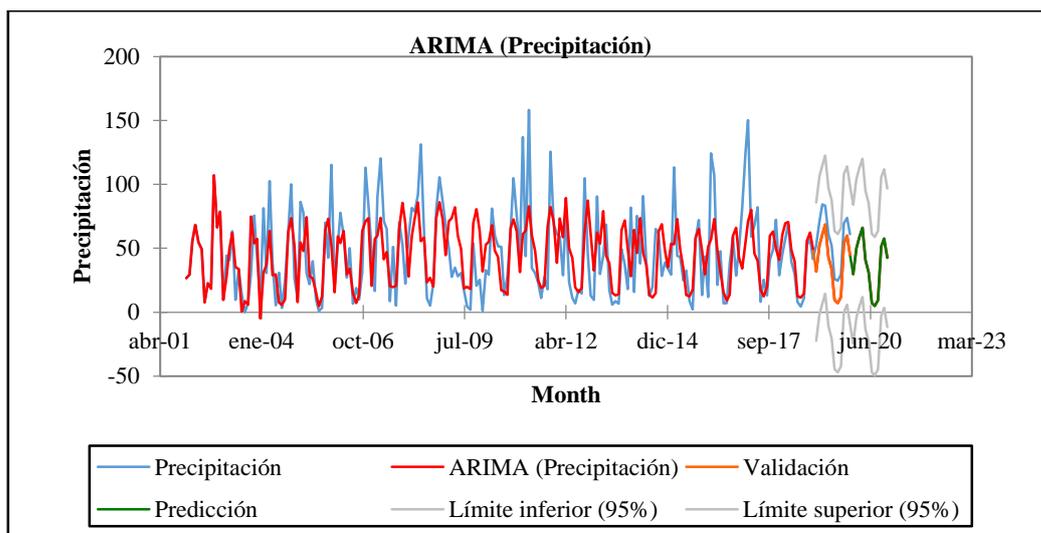


Figura 3-31. Proyección de la precipitación para el año 2020.

Fuente: (Elaboración propia).

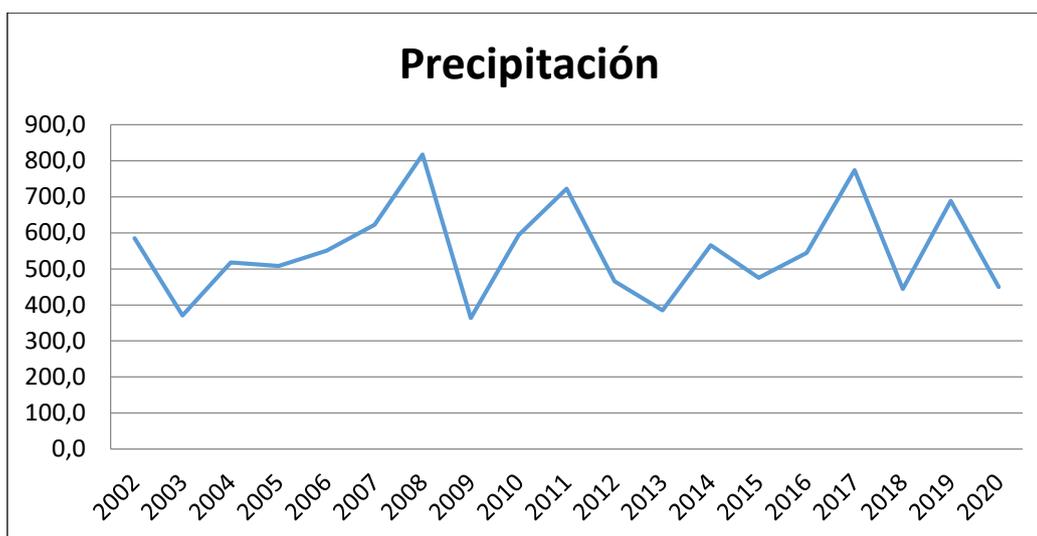


Figura 3-32. Evolución de la precipitación periodo 2002-2020.

Fuente: (Elaboración propia).

La precipitación a lo largo del periodo de tiempo 2002-2020 refleja un comportamiento con grandes fluctuaciones quizá relacionadas con la presencia de fenómenos ENOS. Este resultado también se puede corroborar a partir del test Mann-Kendall (Tabla 3-25) que muestra que no existe una tendencia en la serie analizada. La figura 3-31 muestra claramente que el modelo ARIMA (rojo) sigue una tendencia similar al modelo real (azul) aunque no logra reproducir con fidelidad los eventos extremos; sin embargo, el ajuste del modelo ARIMA con el modelo real y la validación (naranja) son muy similares, por lo que la proyección realizada puede ser aceptada como válida cuando muestra que para el periodo 2002-2020 existirá una disminución de la precipitación. Los valores numéricos son los presentados en la Figura 3-32. Esta tendencia queda mucho más evidenciada si se observa la proyección para el año 2050 (Figura 3-30).

Tabla 3-25. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable precipitación.

Tau de Kendall	0,034
S'	70
Var (S')	9802
Valor-p	0,48
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0,023

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

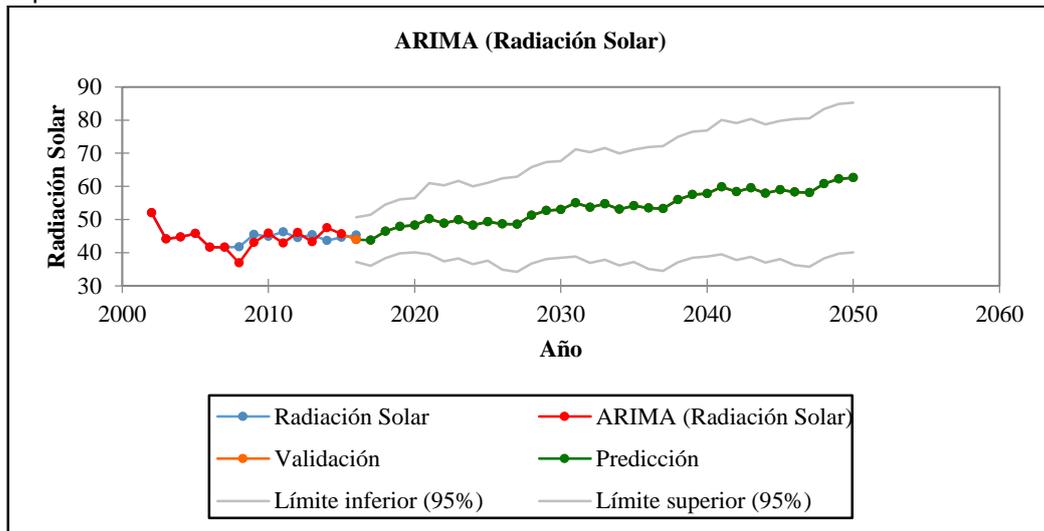


Figura 3-33. Proyección de la precipitación para el año 2050.
Fuente: (Elaboración propia).

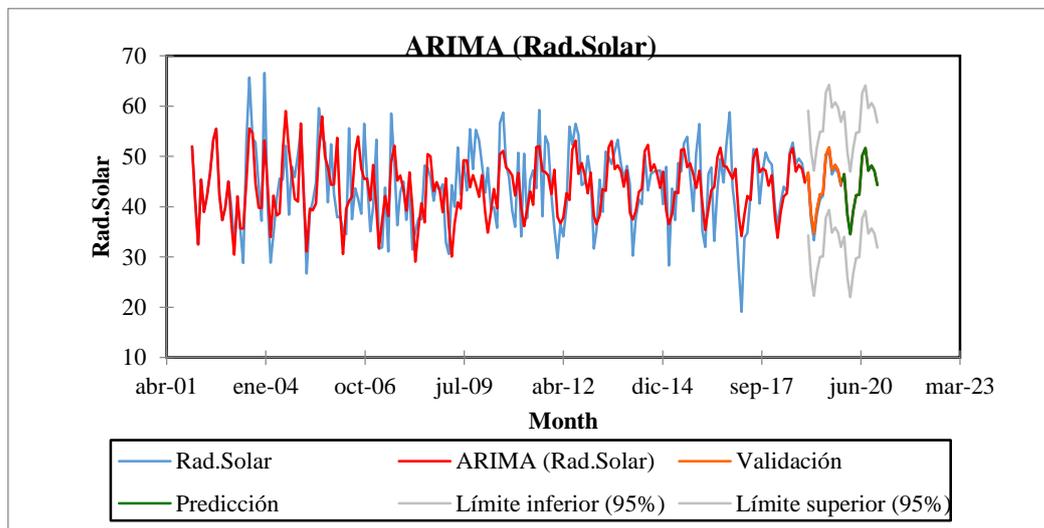


Figura 3-34. Proyección de la radiación solar para el año 2020.
Fuente: (Elaboración propia).

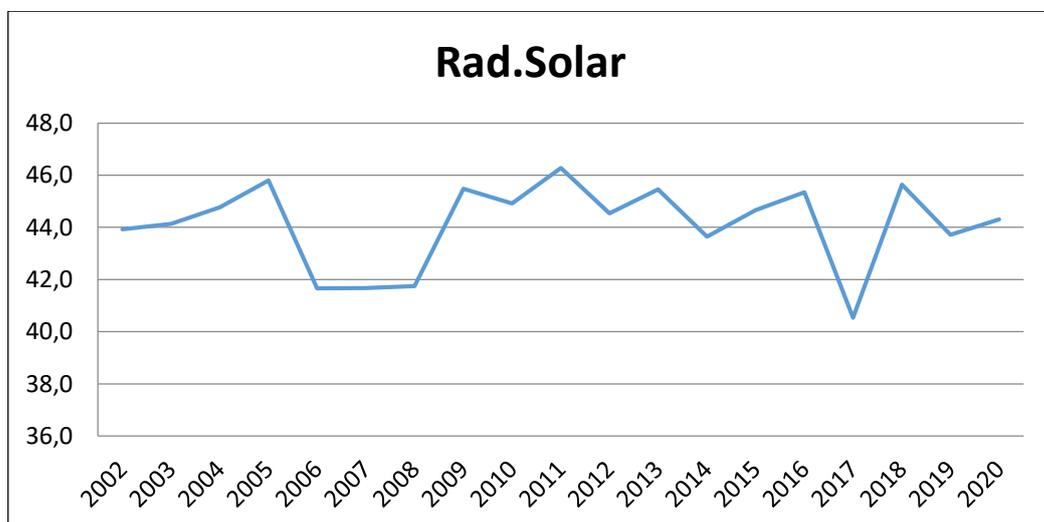


Figura 3-35. Evolución de la radiación solar periodo 2002-2020.
Fuente: (Elaboración propia).

La evolución de la radiación solar parece no seguir un patrón establecido si se observan las proyecciones obtenidas para el año 2020 (Figura 3-34), aunque se aprecia una leve disminución a partir del año 2017 (Figura 3-35) que podría vincularse con varios factores que pueden vincularse con el aumento un aumento en la nubosidad. Sin embargo, si las proyecciones se observan para un período más largo, la variable muestra una tendencia general al aumento hasta el 2050 (Figura 3-34). Estos resultados también se pueden corroborar a partir del test Mann-Kendall (Tabla 3-26).

Tabla 3-26. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable radiación solar.

Tau de Kendall	0,038
S'	77
Var (S')	9797
Valor-p	0,44
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0,044

Fuente: (Elaboración propia).

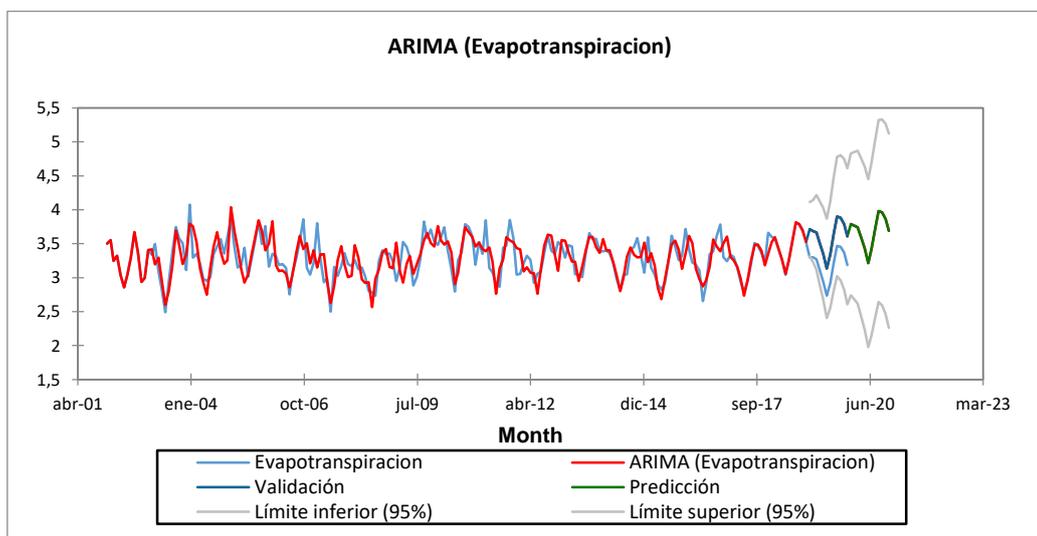


Figura 3-36. Proyección de la evapotranspiración para el año 2020.

Fuente: (Elaboración propia).

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

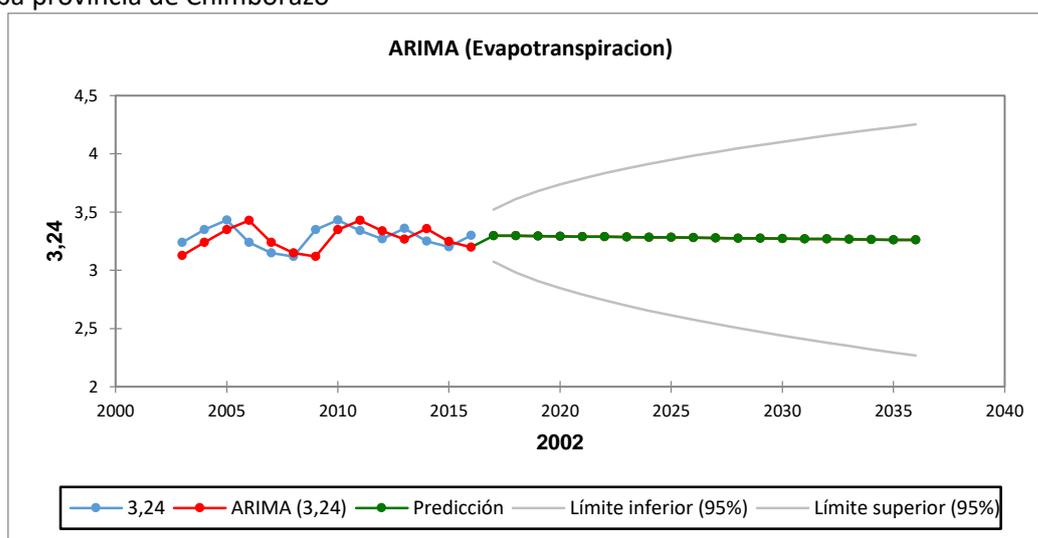


Figura 3-37. Proyección de la evapotranspiración para el año 2050.

Fuente: (Elaboración propia).

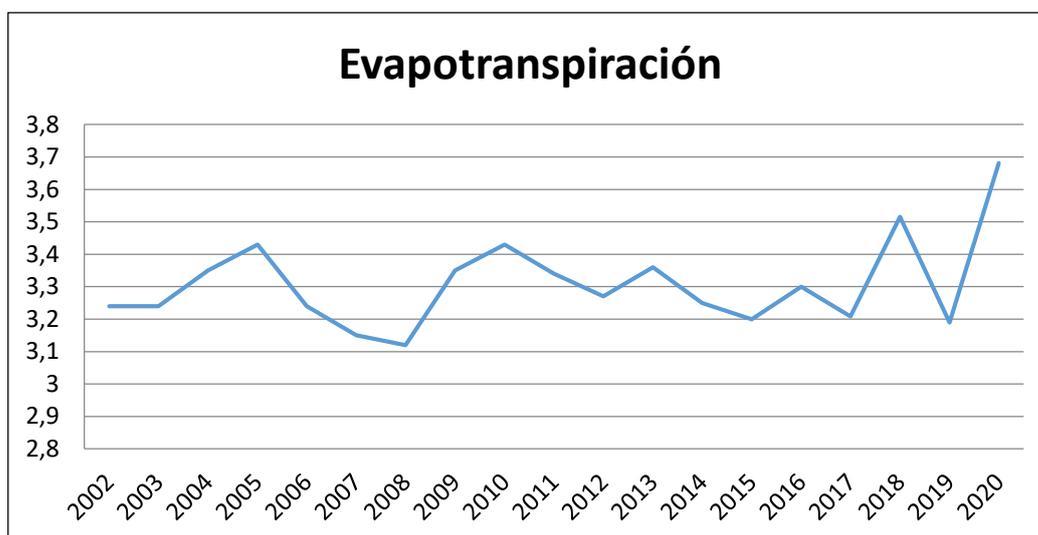


Figura 3-38. Evolución de la evapotranspiración periodo 2002-2020.

Fuente: (Elaboración propia).

Finalmente, la evapotranspiración presentaba una tendencia decreciente hasta el año 2017, a partir del cual se observa un claro aumento en su media en las proyecciones hasta el 2020 (Tabla 3-27). Si la proyección se considera hasta el 2050, en principio la variable se mantendría constante o con un muy leve decrecimiento (Figura 3-36, 3-37 y 3-38).

Tabla 3-27. Prueba estacional de Mann-Kendall para la variable evapotranspiración.

Tau de Kendall	0,097
S'	200
Var (S')	9804
Valor-p	0,043
Nivel de significancia (alfa)	0,05
Pendiente de Sen	0,006

Fuente: Elaboración propia.

El resumen de los valores obtenidos para todas las variables climáticas analizadas se muestra en la Tabla 3-28.

Tabla 3-28. Valores de las variables meteorológicas en estudio para el periodo 2002-2016 y proyecciones anuales 2016-2020 en el cantón Riobamba.

Año	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Humedad (%)	Precipitación (mm/año)	Radiación Solar (%)	Evapotranspiración (mm/día)
2002	21,6	8,4	14,4	55,9	585,0	52,0	3,24
2003	20,7	8,6	13,5	60,8	370,4	44,1	3,24
2004	20,9	8,2	13,8	48,7	517,8	44,8	3,35
2005	21,2	8,1	14,1	60,5	508,0	45,8	3,43
2006	20,6	8,6	13,6	66,1	550,2	41,7	3,24
2007	20,1	8,6	13,4	66,9	622,2	41,7	3,15
2008	19,8	8,5	13,4	67,7	817,3	41,7	3,12
2009	21,2	8,7	14,1	65,8	363,3	45,5	3,35
2010	21,4	8,3	13,9	63,2	593,8	44,9	3,43
2011	21,0	8,0	13,4	62,8	722,4	46,3	3,34
2012	21,0	8,2	13,0	58,8	465,2	44,5	3,27
2013	21,4	8,4	13,6	60,9	385,4	45,5	3,36
2014	21,0	8,8	13,4	63,1	565,9	43,6	3,25
2015	21,0	9,2	13,4	72,7	475,3	44,7	3,20
2016	21,8	9,5	13,9	74,5	544,7	45,4	3,30
2017	21,0	8,9	13,3	76,9	774,2	40,5	3,21
2018	22,2	9,7	13,8	79,8	444,3	45,6	3,52
2019	21,4	9,0	13,5	76,7	688,7	43,7	3,68
2020	22,5	10,1	13,8	85,9	449,3	44,3	3,24

Fuente: (INAMHI, 2016).

A partir de la Tabla 3-28 es posible discriminar la tendencia de cada variable y el grado de variación respecto de la media 2002-2016. En general, todas las variables muestran una tendencia creciente en diferentes grados salvo la precipitación que muestra un comportamiento oscilante y opuesto si consideramos las proyecciones a largo plazo. Estas tendencias coinciden con las expresadas en el trabajo elaborado por la Fundación Carolina (Jiménez, et al., 2012) donde se analiza por medio del modelo PRECIS diferentes índices de vulnerabilidad de varios estados de Ecuador. Allí se observa que la tendencia para la temperatura hasta el 2100 en la provincia de Chimborazo es creciente, con incrementos de 0.44°C por año hasta el 2030.

Por su parte las precipitaciones según el mismo estudio, muestran un decrecimiento de alrededor de 7% también para la misma época. En este caso en particular, las variables que mayor desviación respecto de la media anterior son las temperaturas máximas y mínimas que experimentan una variación de hasta 1.6 °C para el 2020. Adicionalmente, la humedad proyectada para el 2020 muestra valores con incrementos de hasta el 22%. Respecto a las restantes la variación es menor y en general no distan más de 0.5 unidades respecto de sus valores medios.

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

3.8 Comparativa de la evolución del rendimiento del cultivo entre la proyección ARIMA hasta el 2020 y la ecuación de regresión múltiple obtenida aplicando correlación múltiple.

Para comparar la evolución del rendimiento del cultivo de papa para el periodo 2017 – 2020 predicho por el análisis ARIMA con los valores obtenidos por la correlación múltiple de las variables meteorológicas en estudio, en primer lugar es necesario calcular los valores de rendimiento para el periodo 2017 – 2020 utilizando las ecuaciones de regresión múltiple ajustada con los datos obtenidos mediante las predicciones realizadas con el Análisis ARIMA para todas las variables meteorológicas para el mismo periodo de tiempo.

Para el caso de la regresión múltiple de la ecuación (1) y de la ecuación (2), se obtienen los valores de rendimiento que se muestra en la Tabla 3-29, columna Rendimiento (1) y (2) para cada ecuación respectivamente.

Tabla 3-29. Valores de rendimiento obtenidos a partir de la ecuación de regresión múltiple.

Año	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Rendimiento (1)	Rendimiento (2)
	Precipitación	T.Máx	T.Mín	T.Med	Humedad	Rad. Solar	Evapotranspiración		
2017	774,2	21,0	8,9	13,3	76,9	40,5	3,21	11,69	10,69
2018	444,3	22,2	9,7	13,8	79,8	45,6	3,52	26,42	18,25
2019	688,7	21,4	9,0	13,5	76,6	43,7	3,19	10,45	13,65
2020	449,3	22,5	10,1	13,8	85,9	44,3	3,68	33,79	26,26

Fuente: (Elaboración propia).

Estos valores podrían ser comparados con los obtenidos para el rendimiento por medio del programa ARIMA. La comparación se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-30. Comparativa entre los valores de rendimiento para ARIMA y ecuación de regresión.

Año	ARIMA	Ecuación de regresión múltiple ajustada (1)	Ecuación de regresión múltiple ajustada (2)
2017	17,08	11,69	10,69
2018	19,61	26,42	18,25
2019	22,23	10,45	13,65
2020	25,14	33,79	26,26

Fuente: (Elaboración propia).

Los valores de rendimiento obtenidos por el análisis ARIMA y las ecuaciones distan de ser similares, salvo el hecho que en todos los casos se pronostica un aumento en los valores del rendimiento del cultivo para el año 2020, sin embargo, esta diferencia puede ser atribuible a que la ecuación de regresión fue obtenida a partir de datos reales de las variables meteorológicas en estudio con el rendimiento para el periodo 2002 – 2016. Esta diferencia podría evitarse en futuras

predicciones ajustando la ecuación de la recta con los valores de ARIMA proyectados hasta el 2020 tanto para el rendimiento como las variables. Los resultados así obtenidos se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para la recta de regresión (1), se obtiene el nuevo ajuste:

$$Y = -137,16 + 0,015 X_1 + 10,90 X_2 + 7,08 X_3 - 4,02 X_4 - 0,14 X_5 - 1,05 X_6 - 13,01 X_7 \quad (3)$$

Mientras que para la recta de regresión (2), el nuevo ajuste será:

$$Y = -159,05 + 9,47 X_2 + 10,45 X_3 - 5,61 X_4 - 0,25 X_5 + 9,46 X_6 - 0,03 X_1 - 0,90 X_7 \quad (4)$$

Con estos nuevos ajustes, los valores para el rendimiento son los que figuran en la Tabla 3-31.

Tabla 3-31. Rendimiento obtenido a partir de la nueva ecuación de regresión múltiple ajustada.

Año	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	R (3)	R (4)
	Precipitación	T.Máx	T.Mín	T.Med	Humedad	Rad. Solar	Evapotranspiración		
2017	774,2	21,0	8,9	13,3	76,9	40,5	3,21	17,74	19,86
2018	444,3	22,2	9,7	13,8	79,8	45,6	3,52	20,07	18,34
2019	688,7	21,4	9,0	13,5	76,6	43,7	3,19	17,28	19,95
2020	449,3	22,5	10,1	13,8	85,9	44,3	3,68	24,12	25,05

Fuente: (Elaboración propia).

Una vez aplicada la nueva ecuación de regresión múltiple ajustada para el periodo 2017 – 2020 se puede volver a comparar estos valores con los obtenidos por ARIMA para el mismo periodo de tiempo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3-32. Comparativa entre los valores de rendimiento para ARIMA y ecuación de regresión.

Año	ARIMA	Ecuación de regresión múltiple ajustada (3)	Ecuación de regresión múltiple ajustada (4)
2017	17,08	17,74	19,86
2018	19,61	20,07	18,34
2019	22,23	17,28	19,95
2020	25,14	24,12	25,05

Fuente: (Elaboración propia).

De la Tabla-32 se puede apreciar que, una vez realizado el nuevo ajuste, los valores no son tan disímiles (Figura 3-39). Respecto a los resultados del ARIMA, las ecuaciones de regresión tienen entre un 5% (ecuación 1) y un 12% (ecuación 2) de diferencia y nuevamente en todos los casos se espera un rendimiento con tendencia al crecimiento. Este crecimiento varía según el método de estimación, pero estaría entre el 12.4 y 30% para el 2017 y fluctuaría entre el 64 y 65% para el 2020 si consideramos en el cultivo sólo el aporte de las variables analizadas. Los gráficos de la Figura 3-40 muestran esta tendencia.

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

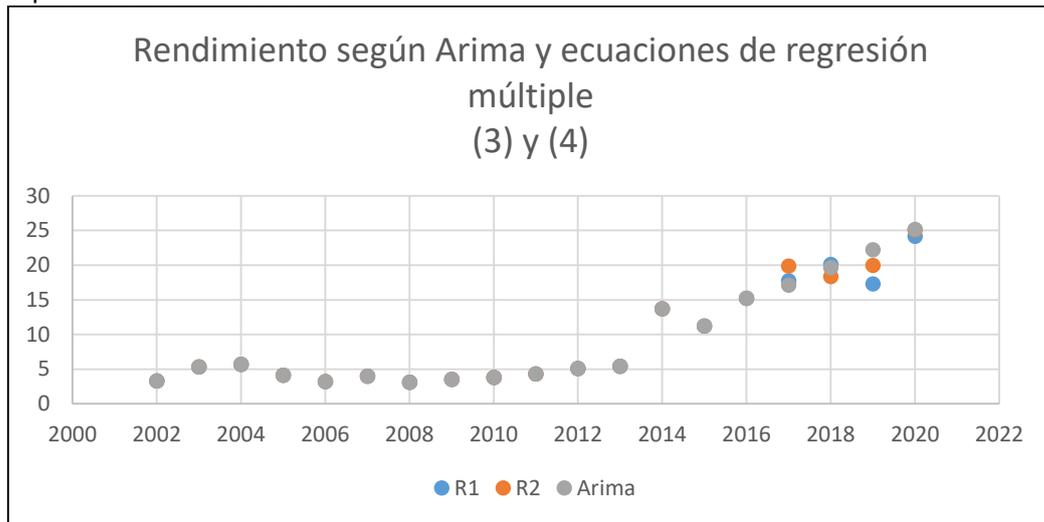
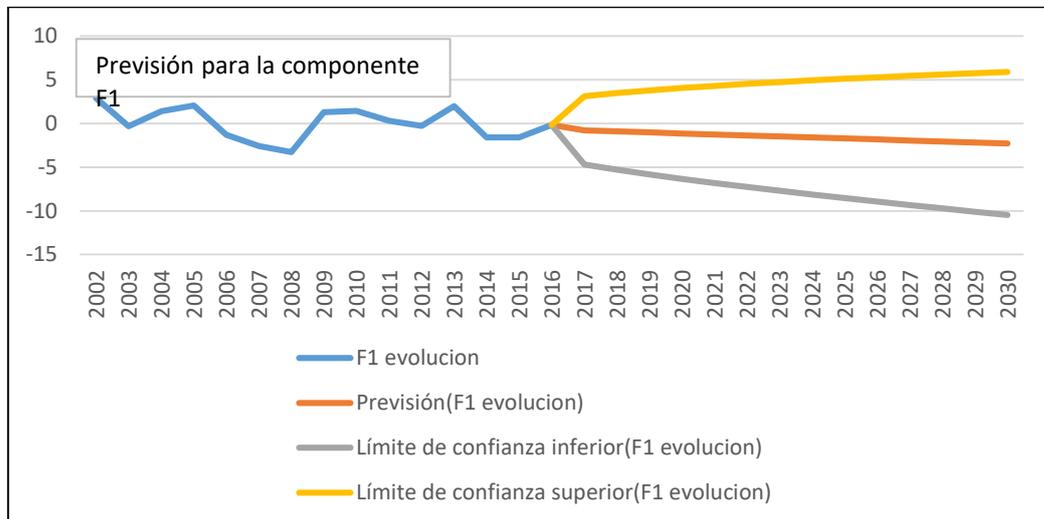


Figura 3-39. Rendimiento ARIMA y ecuaciones de regresión múltiple.
Fuente: (Elaboración propia).

(a) Proyección para la evolución de las componentes F1



(b) Proyección para la evolución de las componentes F2

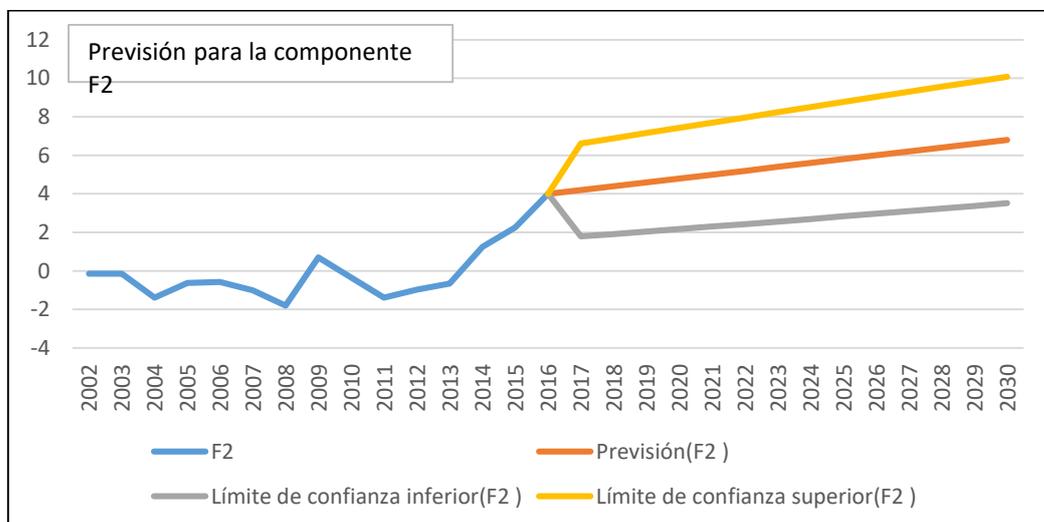


Figura 3-40. Proyección para la evolución de las componentes (a) F1 y (b) F2.
Fuente: (Elaboración propia).

CONCLUSIONES

En las últimas décadas el impacto del cambio climático ha sido producto de estudio no sólo por sus efectos a nivel atmosférico sino también por su importancia en el desarrollo y evolución de las economías nacionales y regionales. Como se mencionó al inicio de este estudio, el cambio climático altera la dinámica natural de la atmósfera e impacta en la variabilidad del clima, afectando directamente todos los aspectos vinculados con el desarrollo social, económico, ambiental y cultural a una escala global y local. De estos impactos, quizá uno de los más relevantes es el relacionado con la seguridad alimentaria. Según la ONU, el mundo necesitará producir casi tres veces más de víveres para alimentar los 9.600 millones de personas que tendrá en el año 2050 el planeta tierra. Parte importante de esa población se encuentra ubicada en América Latina y es vulnerable al Cambio Climático. Ecuador tiene 14.3 millones de habitantes (censo 2010) y una economía que dependen en un casi el 30% del sector de producción primaria. El sector agropecuario ha representado para el período 1970-2008 el 14.2% de su PBI; sin embargo, en los últimos años ha experimentado tasas negativas de crecimiento en parte debido a la incidencia de factores climáticos y meteorológicos.

En los Andes rurales, la papa es una de las principales fuentes de alimentación e ingresos económicos. Su alto aporte energético la convierte en un alimento esencial para aquellas regiones donde existen escasas alternativas productivas. Por ende, es necesario que agricultores e investigadores, así como tomadores de decisión conozcan los efectos que causa el cambio climático sobre su producción y las estrategias disponibles en la actualidad en América Latina y el resto del mundo para disminuirlo. En este sentido el presente trabajo de tesis tuvo como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en el cultivo de la papa en la provincia de Chimborazo ya que posee un alto índice de vulnerabilidad a la variabilidad climática. Para ello, se analizaron los comportamientos de las variables climáticas involucradas en el rendimiento y su futura evolución temporal. Se consideraron las variables temperatura (media, mínima y máxima), la humedad, radiación solar, precipitaciones y evapotranspiración del suelo. De los datos analizados para el período 2000-2016 y obtenidos a partir de la estación meteorológica ubicada en Riobamba, se analizaron las series temporales y su posible correlación con el rendimiento del cultivo, así como su interdependencia.

Las proyecciones a futuro de esas variables así como de la producción, se evaluaron a partir del programa ARIMA, hasta el año 2050 inclusive. Finalmente se utilizó análisis de componentes principales para corroborar la tendencia obtenida en los puntos anteriores. De los resultados obtenidos en el trabajo, se puede observar que las variables climáticas en general tienen una tendencia creciente en la provincia de Chimborazo, a excepción de las precipitaciones, mientras

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo que la radiación solar y la evapotranspiración podrían considerarse estables o con tendencia muy leve a decrecer. Estas variables presentan una correlación con el rendimiento que responde a la forma lineal, si bien un grado de correlación varía. Las variables más altamente ligadas a la producción de la papa resultaron ser la *temperatura mínima y máxima, la humedad relativa y la evapotranspiración*. A partir de esta relación lineal se propuso una regresión múltiple para expresar el rendimiento del cultivo como polinomio en función de las siete variables analizadas y se obtuvo una primera ecuación de primer orden, con un rango de confianza del orden del 90%. Para determinar el grado de influencia de las variables en la producción del cultivo se realizó un análisis de componentes principales. A partir de este análisis se pudo establecer que más del 60% de la varianza del cultivo y las variables puede ser explicada por medio de dos componentes principales. Con este resultado en primer lugar y a la vista de la interdependencia de las variables entre sí, obtenida de la matriz de correlación derivada del análisis de componentes, se propuso una nueva regresión lineal para expresar el rendimiento del cultivo, esta vez en función de seis variables en lugar de siete. Esta segunda ecuación expresa la producción del cultivo con el mismo grado de interdependencia que la anterior.

A partir del modelo ARIMA se proyectó el comportamiento de las variables climáticas hasta el año 2050. Con esta proyección, fue posible obtener información no sólo de las variables sino de la evolución temporal del rendimiento a través de las ecuaciones de regresión lineal antes mencionadas. En estas proyecciones se observó que las mismas tendencias encontradas para el período de análisis 2002-2016, son las que marcan los escenarios a futuro. Es decir, a excepción de la precipitación que se espera tenga valores decrecientes, la temperatura y humedad muestran comportamiento creciente mientras la radiación solar y la evapotranspiración, se mantendrán con valores del orden de los actuales. En otras palabras, se espera que para el próximo lustro, la provincia experimente un aumento de temperatura máxima y mínima que rondan el 7 y 18% respectivamente, mientras que la humedad tendrá un incremento de alrededor del 35%. Por su parte las precipitaciones sufrirán una variación del 16.6% con pendiente negativa.

A partir de estas proyecciones se evaluaron las ecuaciones de regresión múltiple y se pudo observar que tanto la dependiente de siete variables como la de seis, experimentarán un crecimiento continuo hasta el 2020. Es decir, se espera que a partir de la evolución de los parámetros climáticos, el rendimiento del cultivo de papa tenga tendencia creciente en la provincia de Chimborazo.

Por otro lado, se analizó la evolución temporal de las componentes principales que contienen la mayor varianza del conjunto estudiado mediante la serie asociada a cada componente principal, a través de las matriz de autovalores. Por medio del ARIMA se evaluaron las proyecciones a futuro de estas series asociadas. En ambos casos se obtuvieron proyecciones con resultados coincidentes a los analizados por medio de la regresión lineal. Según estas proyecciones, la tendencia para el

2020 estará caracterizada por un incremento en el rendimiento del cultivo asociado a mayores temperaturas y menor precipitación.

En definitiva, se pudo concluir que a pesar de la variabilidad climática pronosticada para Ecuador y en particular para la provincia de Chimborazo, el rendimiento de cultivo de papa seguirá en aumento. Según los resultados previos este aumento será del orden del 60% para el 2020, respecto a los valores del 2016, y en promedio se triplicará en el próximo lustro el rendimiento respecto a la media obtenida en el período de análisis. No se puede concluir de estos resultados que el cambio climático beneficiará el rendimiento ya que para ello se debería poder contrastar estos resultados con aquellos obtenidos si la variabilidad climática fuera menor o nula.

RECOMENDACIONES

Con el fin de profundizar más en el estudio, es necesario considerar las fases fenológicas que atraviesa el cultivo de papa desde su etapa germinal hasta su maduración y consecuente etapa de cosecha, ya que en cada una de estas fases los requerimientos nutricionales del cultivo son distintas, de igual manera las condiciones del suelo y climáticas son imperativas para el correcto desarrollo de la planta y conseguir el rendimiento productivo deseado.

De los resultados anteriores se podría hacer una evaluación económica si pudiéramos conocer para cada grupo o asociación de Unidades de Producción Agropecuarias (UPA's) cuánto se produce en toneladas y dinero y así poder asociar si aún a pesar del incremento de rendimiento del cultivo de papa pueda ser que no haya aumento de ingresos a la economía regional.

Finalmente, para que el estudio resulte ideal en términos estadísticos es necesario contar con datos correspondientes de al menos dos o tres décadas para poder ver si esta década analizada es representativa de la historia del cultivo o no.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado-Rodríguez, G et al. (2016). Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. *Agrociencia*, 50(1), 1-13. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n1/1405-3195-agro-50-01-1.pdf>
- AIDA (Asociación Interamericana para la Defensa del Medio Ambiente). (2011). Principales impactos del cambio climático para los derechos humanos en América Latina. Recuperado de <https://aida-americas.org/es/cambio-clim-tico-y-derechos-humanos-en-am-rica-latina-una-crisis-humana>
- Alccamari, A & García, L. (2016). La percepción por parte de las poblaciones campesinas andinas del cambio climático. *Indagatio Didactica*, 8 (1).
- Altieri, M & Nicholls, I. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*, 3(7), 7-23. Recuperado de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/95471>
- Ávila, Á., Carvajal, Y. & Gutiérrez, S. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120-133. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123921X2014000300010&script=sci_abstr act&tlng=es
- BCE (Banco central del Ecuador). (2014). *Cuentas nacionales anuales*. Quito
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). (2012). *El cambio climático y la producción agrícola*. BID (Banco Interamericano de Desarrollo). (2013). Ecuador: Mitigación y Adaptación al Cambio Climático. *Marco de la preparación de la estrategia 2012-2017 del BID en Ecuador*.
- BM (Banco Mundial). (2010). Informe sobre el desarrollo mundial. *Desarrollo y cambio climático*. Recuperado de <http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-1226014527953/Overview-Spanish.pdf>
- BM (Banco Mundial). (2016). *Datos sobre las cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos sobre cuentas nacionales de la OCDE*. Washington.
- Cáceres, L., Mejía, R. & Ontaneda, G. (1998). Evidencias del cambio climático en Ecuador. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/26431160_Evidencias_del_cambio_climatico_en_Ecuador/download. Quito
- Cevallos, M. (2013). *Documento descriptivo, analítico y comparativo de las políticas públicas sobre cambio climático en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia y su relación con el conocimiento tradicional*. Recuperado de https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/2013_03_consultoria_politicas_publicas_cc_y_conoc_tradicional_docx.pdf
- Cline, W (2007). *Global warming and agriculture: Impact estimates by country*. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=CwIQ-9YdjzQC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Cline,+W.+R.+\(2007\).+Global+warming+and+agriculture:+Impact+estimates+by+country.+Peterson+Institute.+\(pp.1-6\)&ots=tnIYMBxNit&sig=Erk84fGrsDXPRTsSf_Jdmtq3lYo#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=CwIQ-9YdjzQC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Cline,+W.+R.+(2007).+Global+warming+and+agriculture:+Impact+estimates+by+country.+Peterson+Institute.+(pp.1-6)&ots=tnIYMBxNit&sig=Erk84fGrsDXPRTsSf_Jdmtq3lYo#v=onepage&q&f=false)
- Conde-Álvarez, C., & Saldaña-Zorrilla, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30.
- Cuesta, X., Andrade, H., Bastidas, O., Quevedo, R., & Sherwood, S. (2002). Botánica y mejoramiento genético. *El Cultivo de la Papa en Ecuador. M. Pumisacho and S. Sherwood, eds. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y Centro Internacional de la Papa (CIP), Quito, Ecuador*, 33-50.

- Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo
- Cuesta-Camacho, F., Peralvo, M., & Ganzenmüller, A. (2008). Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales. *Páramo y cambio climático*. University of Texas at Austin, Ecociencia
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2015a). Estimación de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo*, Roma
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2015b). Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador. *Evaluación de impacto y directrices de política*. Roma
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2014). *Anuario estadístico*, Roma
- FAOSTAT, D. (2013). Food and agriculture organization of the United Nations. *Statistical database*.
- Feo, O., Solano, E., Beingolea, L., Aparicio, M., Villagra, M., José Prieto, M., & Beckmann, J. (2009). Cambio climático y salud en la región andina. *Revista peruana de Medicina experimental y Salud pública*, 26(1), 83-92.
- GADMR (Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Riobamba). (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Riobamba 2015-2019*. Riobamba-Ecuador.
- GADPCH (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de la Provincia de Chimborazo). (2012). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Chimborazo, sistema territorial actual, tendencial y presupuesto*. Riobamba-Ecuador
- GADPCH (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de la Provincia de Chimborazo). (2011). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Chimborazo*. Riobamba-Ecuador
- Galindo, L. M., Samaniego, J., Alatorre, J. E., Ferrer, J., & Reyes, O. (2014). Cambio climático, agricultura y pobreza en América Latina: Una aproximación empírica. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/37045>
- Gobierno de Ecuador. (2011). *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático*, Quito.
- Gobierno de Ecuador. (2016). *Primer informe de actualización bienal ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, Quito.
- Herzog, S. K., Martinez, R., Jorgensen, P., & Tiessen, H. (2012). Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales. *Inter-American institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)*. 348pp. Paris
- Hidalgo-Proaño, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *Revista CienciAmérica*, 6(2), 42-47.
- Hole, D. G., Young, K. R., Seimon, A., Wichtendahl, C. G., Hoffmann, D., Páez, K. S., & Ramírez, E. (2011). Manejo adaptativo para la conservación de la biodiversidad frente al cambio climático, perspectiva en los Andes tropicales. *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales*, 23-55.
- Honty, G. (2007). América Latina ante el cambio climático. *AMERICA LATINA*. Recuperado de https://flacsoandes.edu.ec/web/imagesFTP/1269363645.Honty_America_Latina_frente_a_l_cambio_climatico.pdf
- IGM (Instituto Geográfico Militar del Ecuador). (2017). *Carta topográfica cantón Riobamba escala 1:50.000*. Quito, Ecuador. Recuperado en http://www.igm.gob.ec/work/files/cartabase/enie/ENIEIV_E2.htm
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador). (2016). *Anuarios meteorológicos* Recuperado en <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/>
- INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador). (2010). *Características generales del clima en el Ecuador*. Estudios meteorológicos, Quito

- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador). (2016). *Resultados del censo poblacional 2010*. Recuperado en <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/resultados/>
- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador). (2016). *ESPAC (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua)*. Recuperado en <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales). (2010). Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, 100(3-4), 337-350.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*, [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). (2007). the physical science basis: *Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.
- Jiménez, S., Castro, L., Yépez, J., & Wittmer, C. (2012). Impacto del cambio climático en la agricultura de subsistencia en el Ecuador. *Fundación Carolina - CeALCI*. Madrid-España.
- Lavalle, A. L., Micheli, E. B., & Rubio, N. (2006). Análisis didáctico de regresión y correlación para la enseñanza media. *Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa*, 9(3), 383-406.
- MAE (Ministerio del Ambiente Ecuador). (2015a). Estadísticas de patrimonio natural. *Datos de bosques, ecosistemas, especies, carbono y deforestación del Ecuador continental*. Quito
- MAE (Ministerio del Ambiente Ecuador). (2015b). *Cambio climático y agua. Una guía para la acción ciudadana*. Quito-Ecuador.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2016). *Sistema de información pública agropecuaria (SIPA)*. Quito. Ecuador.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2014a). *Zonas de susceptibilidad a sequías en el Ecuador continental*.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2014b). *Zonas de susceptibilidad a inundaciones en el Ecuador continental*.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2014c). *Zonas de susceptibilidad a desertificación en el Ecuador continental*.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2010). *Seguro Agrícola*.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador). (2000). *III censo nacional agropecuario*. Recuperado en [<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-nacional-agropecuario/>]. Quito.
- Maletta, H. (2009). El pan del futuro: cambio climático, agricultura y alimentación en América Latina. *Debates en Sociología*, (34).
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2000). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña, 2000*, 13-27.
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América). (2018). *Cold & warm episodes by season*. Maryland, USA. Recuperado en http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Ortiz, R. (2012). El cambio climático y la producción agrícola. *Banco Interamericano de Desarrollo*, pp. 6-31
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2016). *GEO6. Resumen de las evaluaciones regionales del sexto informe sobre las perspectivas del medio ambiente mundial: resultados principales y mensajes políticos*.

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

- Ramírez, V. H., & Jaramillo, A. (2009). Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia. Recuperado en [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)161-172.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)161-172.pdf)
- Ramos, J. (2016). *Análisis de escenarios del clima causados por la pérdida de bosque y la actividad ganadera con visión ecosistémica salud-ambiente en el cantón San Miguel de los Bancos* (Tesis de pregrado). Universidad Central, Quito - Ecuador.
- Rojas, E. (2011). *Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Samaniego, J. (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Reseña 2009. CEPAL. Recuperado en <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/2975>
- SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo). (2009). *Plan nacional para el buen vivir 2009-2013: Construyendo un estado Plurinacional e Intercultural*. Quito – Ecuador.
- VanderMolen, K. (2011). Percepciones de cambio climático y estrategias de adaptación en las comunidades agrícolas de Cotacachi. *Revista EcuadorDebate*. Quito. Recuperado en <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/4263>
- Vargas, A. R. (2007). Cambio climático, agua y agricultura. *Desde la Dirección de Liderazgo Técnico y Gestión del Conocimiento-IICA*, 13. Recuperado en <http://repiica.iica.int/docs/B0482E/B0482E.PDF>
- Vargas, P. (2009). *El cambio climático y sus efectos en el Perú*. Banco Central de Reserva del Perú. Lima. Recuperado en <http://www.rcfreak.at/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf>
- Vega, E. C., & Jara, J. C. (2009). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola*, 29(3), 390-403.
- Vergara, W, et al., (2007). Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 88, no 25, p. 261-264.
- Walsh, B., Ciais, P., Janssens, I. A., Penuelas, J., Riahi, K., Rydzak, F., & Obersteiner, M. (2017). Pathways for balancing CO2 emissions and sinks. *Nature Communications*, 8, 14856 doi: 10.1038/ncomms14856 (2017). Recuperado en <https://www.nature.com/articles/ncomms14856/>
- Wissar, R., & Ortíz, R. (1988). *Mejoramiento de papa en el CIP [Centro Internacional de la Papa] por adaptación a climas cálidos tropicales* (No. F30 W5 No. 22-S). Centro Internacional de la Papa, Lima (Peru).
- Zapata, E., Jarvis, A., Ramírez, J., Lau, C. (2011). Potenciales impactos del cambio climático en cultivos Andinos. Serie panorama Andino sobre cambio climático. Decision and Policy Analysis Program (ADPA). CONDENSAN, SGCAN. Lima

ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de distribución t-student de 1 y 2 colas.

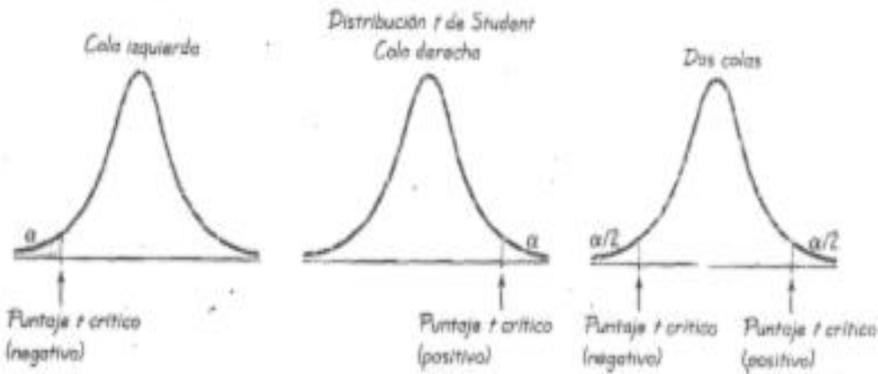


TABLA A-3 Distribución t

Grados de libertad	• α					
	.005 (una cola) .01 (dos colas)	.01 (una cola) .02 (dos colas)	.025 (una cola) .05 (dos colas)	.05 (una cola) .10 (dos colas)	.10 (una cola) .20 (dos colas)	.25 (una cola) .50 (dos colas)
1	63.657	31.821	12.706	6.314	3.078	1.000
2	9.925	6.965	4.303	2.920	1.886	.816
3	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638	.765
4	4.604	3.747	2.776	2.132	1.533	.741
5	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476	.727
6	3.707	3.143	2.447	1.943	1.440	.718
7	3.500	2.998	2.365	1.895	1.415	.711
8	3.355	2.896	2.306	1.860	1.397	.706
9	3.250	2.821	2.262	1.833	1.383	.703
10	3.169	2.764	2.228	1.812	1.372	.700
11	3.106	2.718	2.201	1.796	1.363	.697
12	3.054	2.681	2.179	1.782	1.356	.696
13	3.012	2.650	2.160	1.771	1.350	.694
14	2.977	2.625	2.145	1.761	1.345	.692
15	2.947	2.602	2.132	1.753	1.341	.691
16	2.921	2.584	2.120	1.746	1.337	.690
17	2.898	2.567	2.110	1.740	1.333	.689
18	2.878	2.552	2.101	1.734	1.330	.688
19	2.861	2.540	2.093	1.729	1.328	.688
20	2.845	2.528	2.086	1.725	1.325	.687
21	2.831	2.518	2.080	1.721	1.323	.686
22	2.819	2.508	2.074	1.717	1.321	.686
23	2.807	2.500	2.069	1.714	1.320	.685
24	2.797	2.492	2.064	1.711	1.318	.685
25	2.787	2.485	2.060	1.708	1.316	.684
26	2.779	2.479	2.056	1.706	1.315	.684
27	2.771	2.473	2.052	1.703	1.314	.684
28	2.763	2.467	2.048	1.701	1.313	.683
29	2.756	2.462	2.045	1.699	1.311	.683
Grande (z)	2.575	2.327	1.960	1.645	1.282	.675

Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

ANEXO 2. Tablas de conversión.

ANEXO 2.A

TABLA DE CALCULO DE HELIOFONIA																							
H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%	H	%
0.1	0	1.1	0	2.1	1	3.1	2	4.1	3	5.1	4	6.1	5	7.1	6	8.1	7	9.1	6	10.1	8	11.1	92
0.2	0	1.2	1	2.2	2	3.2	3	4.2	4	5.2	5	6.2	6	7.2	7	8.2	8	9.2	7	10.2	9	11.2	93
0.3	0	1.3	1	2.3	2	3.3	3	4.3	4	5.3	5	6.3	6	7.3	7	8.3	8	9.3	7	10.3	9	11.3	94
0.4	0	1.4	2	2.4	3	3.4	4	4.4	5	5.4	6	6.4	7	7.4	8	8.4	9	9.4	8	10.4	10	11.4	95
0.5	0	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	8	10.5	11	11.5	96
0.6	0	1.6	3	2.6	4	3.6	5	4.6	6	5.6	7	6.6	8	7.6	9	8.6	10	9.6	9	10.6	12	11.6	97
0.7	0	1.7	4	2.7	5	3.7	6	4.7	7	5.7	8	6.7	9	7.7	10	8.7	11	9.7	10	10.7	13	11.7	97
0.8	0	1.8	5	2.8	6	3.8	7	4.8	8	5.8	9	6.8	10	7.8	11	8.8	12	9.8	11	10.8	14	11.8	98
0.9	0	1.9	6	2.9	7	3.9	8	4.9	9	5.9	10	6.9	11	7.9	12	8.9	13	9.9	12	10.9	15	11.9	99
1.0	0	2.0	7	3.0	8	4.0	9	5.0	10	6.0	11	7.0	12	8.0	13	9.0	14	10.0	13	11.0	16	12.0	100

ANEXO 2.B

TABLA DE CONVERSION DE mmHg a hPa (K=1,33333224)										
mmHg	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
543	723,99	724,09	724,19	724,29	724,39	724,49	724,59	724,69	724,79	724,89
544	725,33	725,43	725,53	725,63	725,73	725,83	725,93	726,03	726,13	726,23
545	726,66	726,76	726,86	726,96	727,06	727,16	727,26	727,36	727,46	727,56
546	727,99	728,09	728,19	728,29	728,39	728,49	728,59	728,69	728,79	728,89
547	729,33	729,43	729,53	729,63	729,73	729,83	729,93	730,03	730,13	730,23
548	730,66	730,76	730,86	730,96	731,06	731,16	731,26	731,36	731,46	731,56
549	731,09	732,09	732,19	732,29	732,39	732,49	732,59	732,69	732,79	732,89
550	733,33	733,43	733,53	733,63	733,73	733,83	733,93	734,03	734,13	734,23
551	734,66	734,76	734,86	734,96	735,06	735,16	735,26	735,36	735,46	735,56

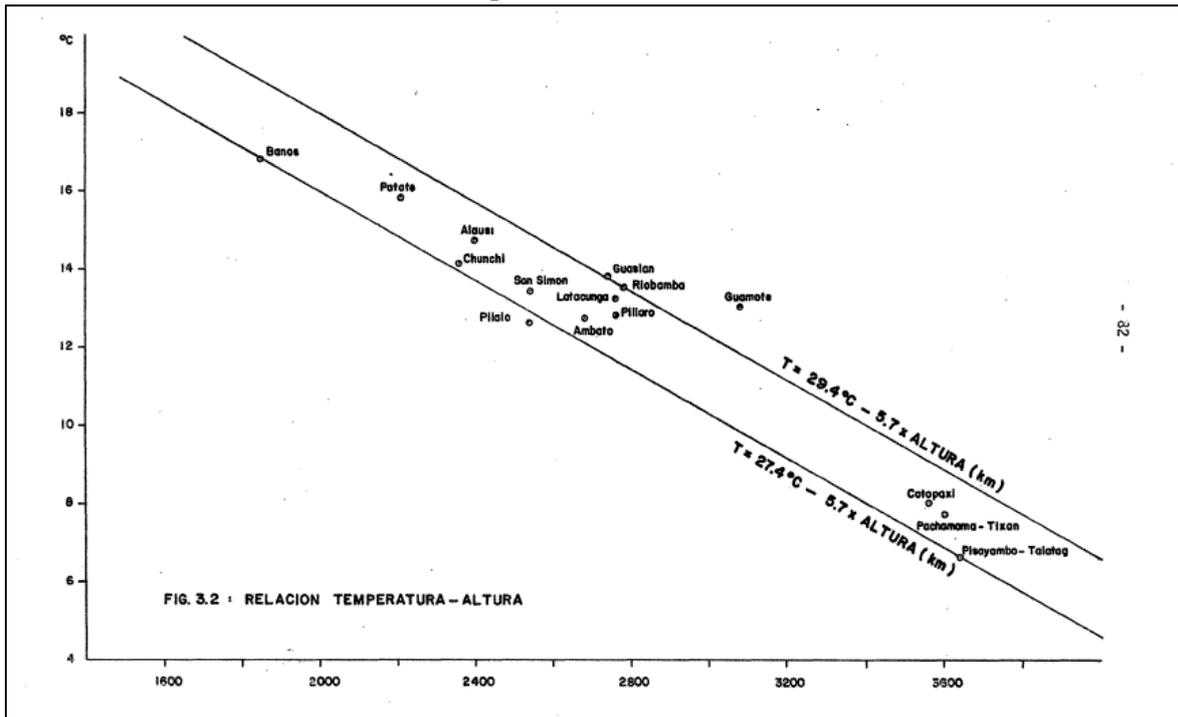
ANEXO 2.C

TABLA DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA Y GRAVEDAD										
mmHg/T	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
545	2,85	2,89	2,94	2,97	3,03	3,07	3,11	3,16	3,20	3,25
550	2,86	2,90	2,95	2,99	3,04	3,08	3,13	3,17	3,21	3,26
555	2,87	2,91	2,96	3,00	3,05	3,09	3,14	3,19	3,23	3,28
mmHg/T	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5
545	3,29	3,34	3,39	3,42	3,47	3,52	3,56	3,60	3,65	3,70
550	3,30	3,35	3,39	3,43	3,48	3,53	3,57	3,61	3,66	3,71
555	3,22	3,37	3,44	3,45	3,50	3,55	3,59	3,63	3,68	3,73
mmHg/T	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
3,75	3,81	3,86	3,91	4,96	5,01	5,06	5,11	5,16	5,21	5,26
mmHg/T	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5
5,26	5,31	5,36	5,41	5,46	5,51	5,56	5,61	5,66	5,71	5,76

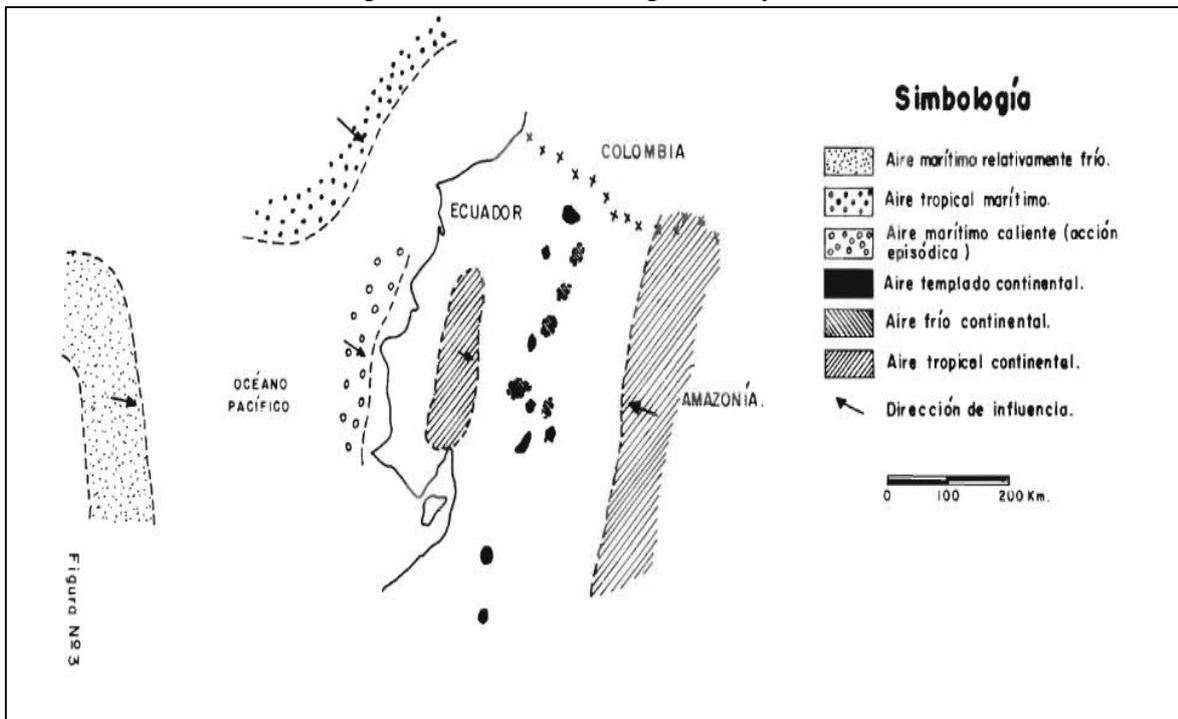
ANEXO 3. Tabla de radiación solar extraterrestre (Ro) en mm/día

Tabla de Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) (Original en MJ·m ⁻² ·día ⁻¹ ; 1 mm/día = 2,45 MJ·m ⁻² ·día ⁻¹)																								
Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	46.1	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

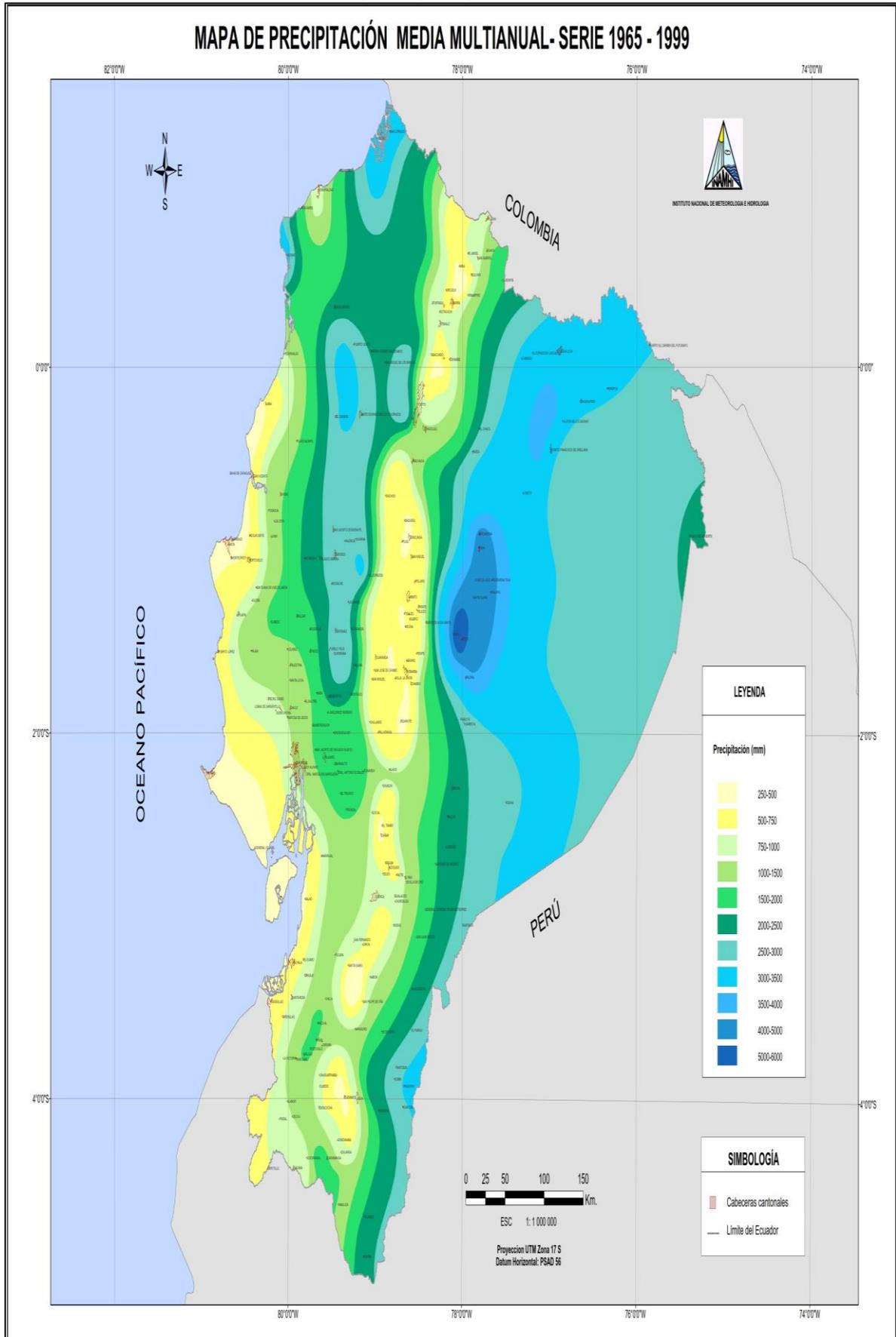
ANEXO 4. Relación temperatura – altura en la cuenca del Pastaza.



ANEXO 5. Principales masas de aire regionales y locales en el Ecuador

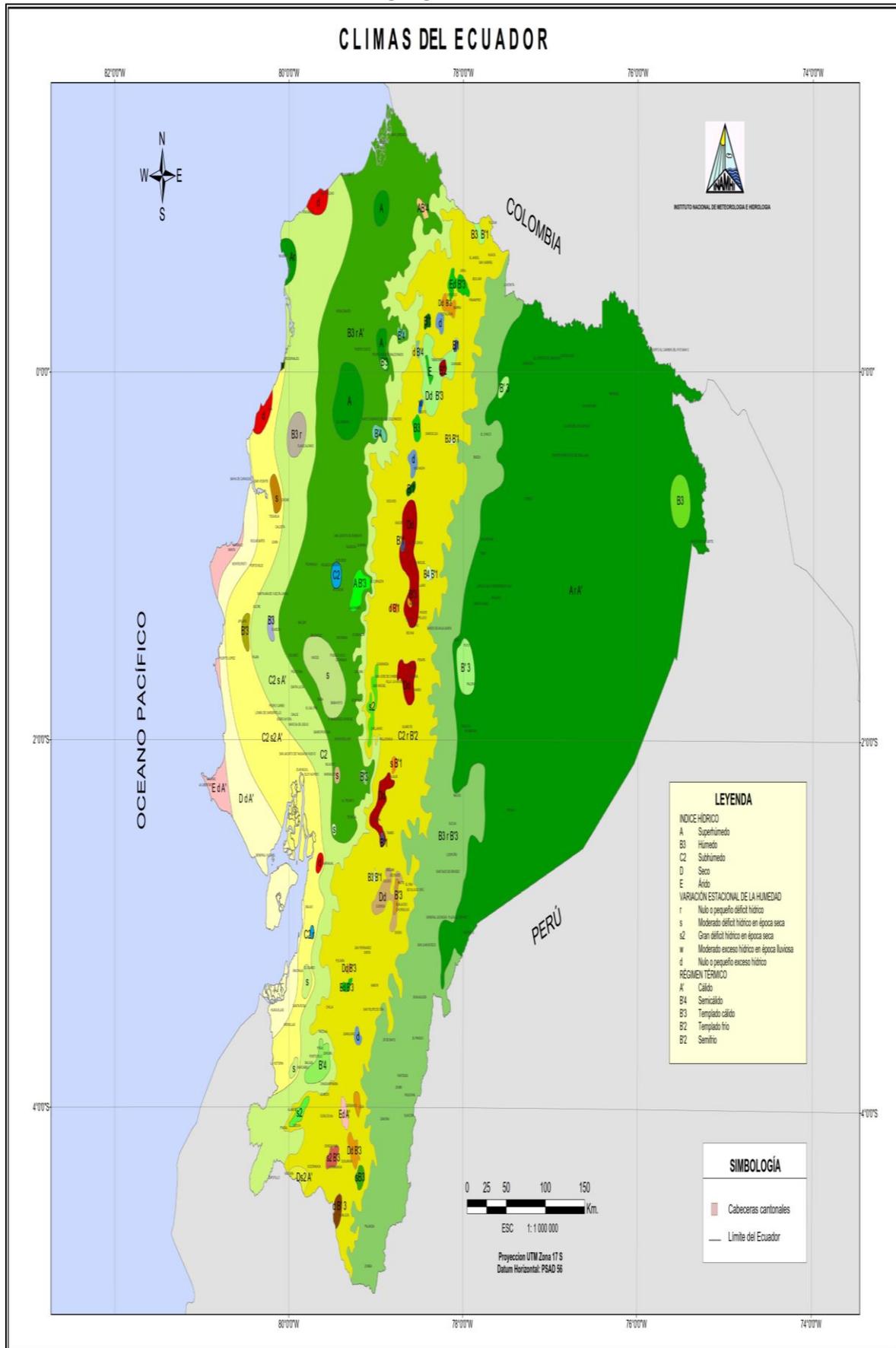


ANEXO 6. Mapa de precipitaciones en Ecuador.

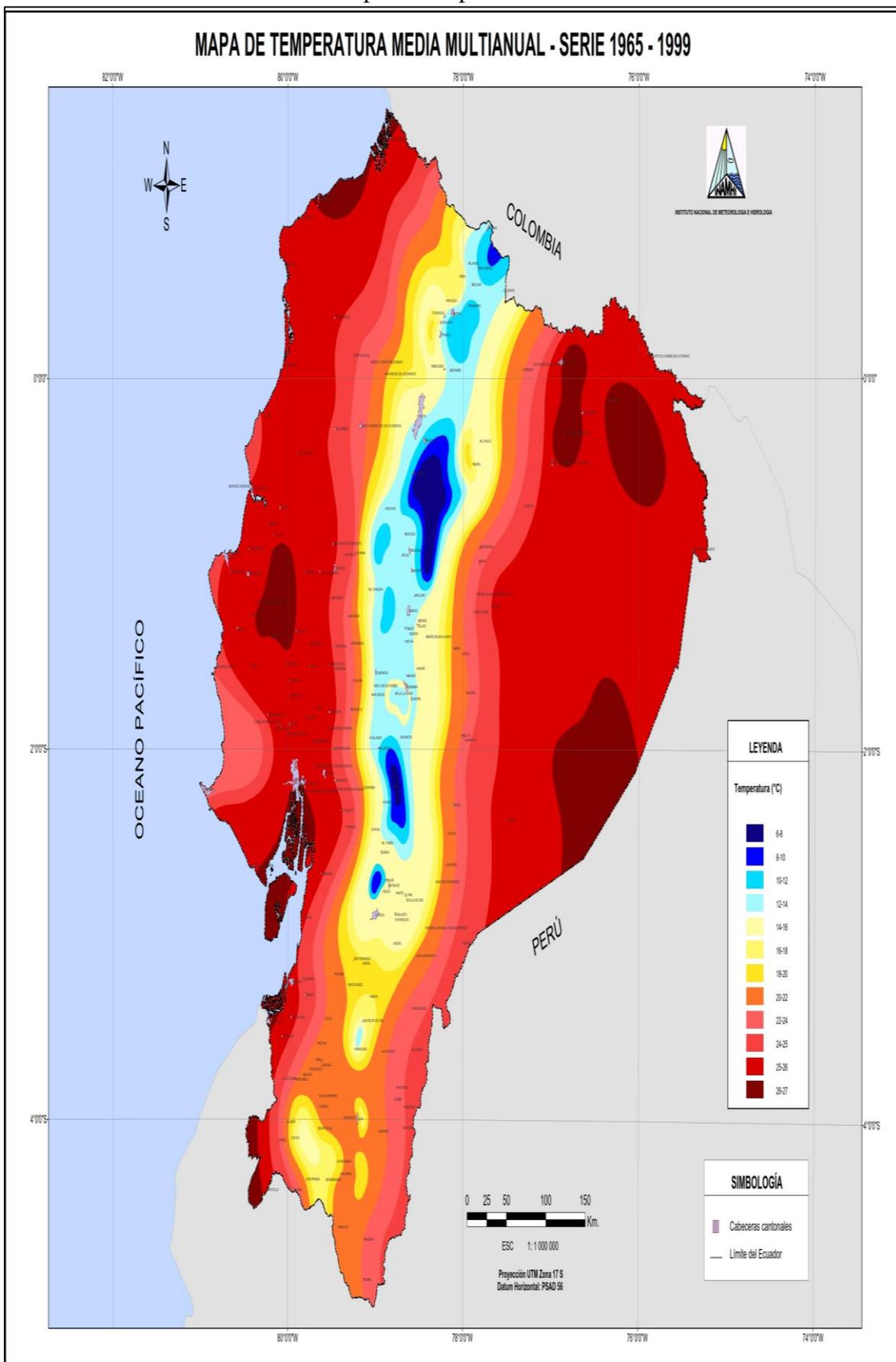


Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

ANEXO 7. Distribución geográfica de los climas en el Ecuador.

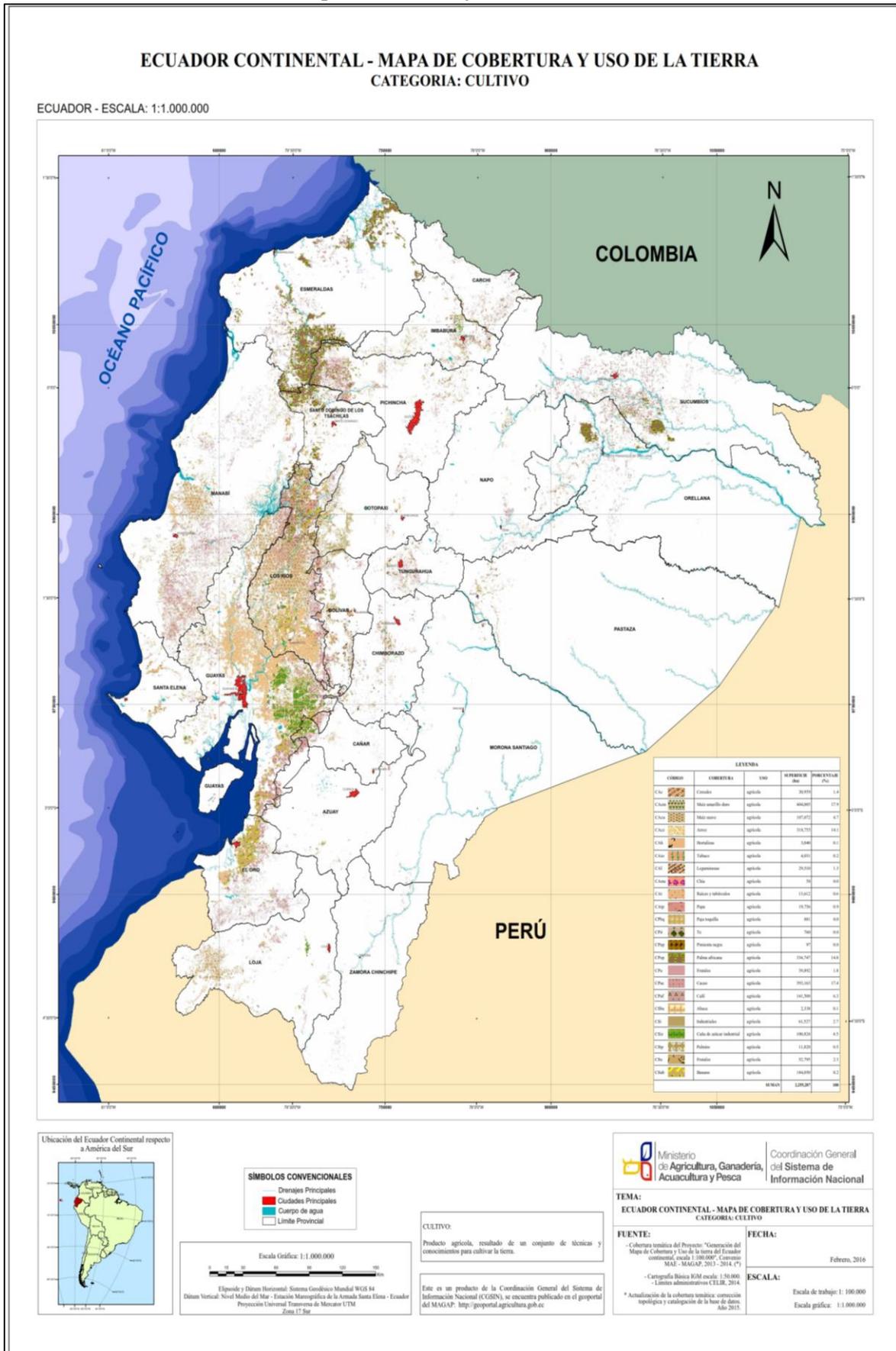


ANEXO 8. Mapa de temperaturas en el Ecuador.



Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

ANEXO 9. Mapa de cultivos y usos de suelo en Ecuador.



Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

ANEXO 11. Registro fotográfico de la estación agro meteorológica ESPOCH-INAMHI.

ANEXO 11.A



ANEXO 11.B



ANEXO 11.C



Efectos del cambio climático en la evolución del rendimiento productivo del cultivo de papa en el cantón Riobamba provincia de Chimborazo

ANEXO 13. Índice de El Niño Oceánico (INO) periodo 2002-2016.

AÑO	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
								El Niño				
								La Niña				