



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



Universidad Nacional "San Luis Gonzaga"

Software Antiplagio



UNICHECK

INFORME DE REVISIÓN

Se ha realizado el análisis con el software antiplagio de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", por parte de los docentes reponsables, al documento cuyo título es:

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO DE LA CUENCA RIO ICA-ALTO PAMPAS, APLICANDO EL MODELO HIDROLOGICO WEAP, 2021

presentado por:

YANERSY KENHLY HUAMANI URIBE

del nivel **PREGRADO** de la facultad de **INGENIERIA CIVIL** obteniéndose como resultado una coincidencia de **9.16%** otorgándosele el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presenta el reporte de evaluación del software antiplagio.

Observaciones:

APROBADO LA EVALUACION DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE TESIS el cual se evidencia el Nivel de Similitud del 9.16% de conformidad a la R.R. 1668 - R - UNICA - 2020, art. 18.2

Ica, 12 de Febrero de 2021

**MARTIN HAMILTON WILSON
HUAMANCHUMO
COORDINADOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

**EDITH ISABEL GUERRA LANDA
ASESOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
Facultad de Ingeniería Civil



**“Influencia del cambio climático en la disponibilidad del
recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, aplicando el
modelo hidrológico WEAP, 2021”**

Recursos hídricos, riesgo de desastres y cambio climático

INFORME FINAL DE TESIS

HUAMANI URIBE, YANERSY KENHLY

Ica, Perú

2022

DEDICATORIA

A mis padres y hermano por su apoyo y motivación

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a mi asesor MSc. Freddy Franco Alvarado por su guía durante la elaboración del presente trabajo de investigación.

Mi gratitud al Ing. Gustavo De la Cruz Montalvo del SENAMHI, por su guía en el análisis de la información de cambio climático; y apoyo con sus sugerencias y comentarios a la presente investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	Realidad problemática.....	12
1.2	Antecedentes.....	13
1.3	Justificación.....	16
1.4	Objetivos de la investigación.....	16
1.5	Hipótesis de investigación.....	17
II.	ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	18
2.1	Delimitación de la investigación.....	18
2.1.1	Delimitación espacial.....	18
2.1.2	Delimitación temporal.....	18
2.1.3	Delimitación social.....	18
2.1.4	Delimitación conceptual.....	18
2.2	Diseño Metodológico.....	18
2.2.1	Diseño de investigación.....	18
2.2.2	Tipo y Nivel de investigación.....	19
2.2.3	Población y muestra.....	19
2.2.4	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	20
2.3	Secuencia metodológica.....	22
2.3.1	Recopilación de Información.....	22
2.3.1.1	Descripción de la zona de estudio.....	22
2.3.1.2	Información Hidrometereológica.....	25
2.3.1.3	Información climática futura.....	26
2.3.2	Análisis de información pluviométrica.....	30
2.3.2.1	Diagrama de cajas.....	30
2.3.2.2	Análisis gráfico.....	31
2.3.2.3	Análisis de consistencia.....	32
2.3.2.4	Análisis estadístico de saltos y tendencias.....	38
2.3.3	Análisis de información hidrométrica.....	40
2.3.3.1	Diagrama de cajas.....	41
2.3.3.2	Análisis Gráfico.....	41
2.3.3.3	Análisis estadístico de saltos y tendencias.....	42
2.3.4	Análisis de información climática futura.....	42
2.3.4.1	Preparación de la información climática.....	42
2.3.4.2	Validación de información de los modelos climáticos.....	43
2.3.4.3	Corrección de bias de información de los modelos climáticos.....	45
2.3.4.4	Aplicación de la corrección a los escenarios futuros.....	46
2.3.5	Modelación hidrológica con WEAP.....	46
2.3.5.1	Delimitación de hidrográfica de subcuencas.....	46

2.3.5.2	Mapa de cobertura vegetal.....	48
2.3.5.3	Catchments	49
2.3.5.4	Modelo Hidrológico “WEAP”- Método Humedad del Suelo	49
2.3.5.5	Definición del esquema del modelo.....	50
2.3.5.6	Ingreso de datos para la simulación	51
2.3.5.7	Calibración y validación.....	53
III.	RESULTADOS	55
3.1	Cambios futuros en la precipitación y temperatura.....	55
3.2	Disponibilidad del recurso hídrico	60
3.3	Resumen de resultados	65
IV.	DISCUSIÓN	68
V.	CONCLUSIONES.....	70
VI.	RECOMENDACIONES.....	72
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Escenarios de cambio climático en las cuencas de los ríos Ica y Pisco a 2030	14
Tabla 2.	Modelos climáticos globales y regionalizados para la cuenca del río Ica	26
Tabla 3.	Estaciones hidrometeorológicas	27
Tabla 4.	Extensión de datos pluviométricos observados	29
Tabla 5.	Parámetros para determinar la homogeneidad - Zona 2	36
Tabla 6.	Parámetros para determinar la homogeneidad – Zona 3	37
Tabla 7.	Parámetros para determinar la homogeneidad – Zona4	38
Tabla 8.	Pruebas estadísticas para el análisis de consistencia	40
Tabla 9.	Pruebas estadísticas para el análisis de consistencia	42
Tabla 10.	Agrupación de cobertura vegetal de la cuenca en estudio	51
Tabla 11.	Distribución de las coberturas la cuenca en estudio.....	51
Tabla 12.	Parámetros de la calibración	53
Tabla 13.	Indicadores de eficiencia del modelo WEAP	53
Tabla 14.	Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Ica.....	55
Tabla 15.	Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual	56
Tabla 16.	Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual	57
Tabla 17.	Variación futura de la precipitación acumulada anual de los modelos considerados...57	
Tabla 18.	Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual	58
Tabla 19.	Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual	59
Tabla 20.	Variación futura de la temperatura anual de los modelos considerados.....59	
Tabla 21.	Variación del caudal medio anual de los modelos considerados	60
Tabla 22.	Variación del caudal medio anual de los modelos considerados	61
Tabla 23.	Variación del caudal medio anual de los modelos considerados	62
Tabla 24.	Caudal del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual.....	63
Tabla 25.	Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual.....	64
Tabla 26.	Variación del caudal anual para los modelos considerados	64
Tabla 27.	Caudal medio anual histórico y futuro en la estación hidrométrica La Achirana	65
Tabla 28.	Influencia del cambio climático en el caudal periodo 2021-2040.....	66
Tabla 29.	Variación Influencia del cambio climático en el caudal periodo 2041-2060.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ficha para recolección de dato documentales	20
Figura 2. Ficha de campo	21
Figura 3. Diagrama de flujo metodológico.....	22
Figura 4. Ubicacion geográfica de la cuenca integrada.....	23
Figura 5. Dominio sobre Sur América	26
Figura 6. Estaciones hidrometereológicas	28
Figura 7. Partes de un diagrama de caja.....	30
Figura 8. Diagrama de Cajas Estación Precipitación	31
Figura 9. Histograma de Precipitación Total Mensual Histórica.....	31
Figura 10. Formato de entrada en el software Past3.....	33
Figura 11. Agrupación jerárquica	33
Figura 12. Mapa de clasificación climática en la Cuenca del río Ica-Alto Pampas elaborado para la presente tesis.	35
Figura 13. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 2 (Brunet Moret)	36
Figura 14. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 3 (Brunet Moret)	37
Figura 15. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 4 (Brunet Moret)	38
Figura 16. Diagrama de Cajas Estación La Achirana (Caudal).....	41
Figura 17. Descargas medias mensuales (m ³ /s) - Registro histórico 1964 -2005	41
Figura 18. Dominio Sur América en grilla irregular a una resolución de 0.22° x 0.22° del modelo climático regional forzado con el modelo HadGem2-ES-REMO_Historico.....	43
Figura 19. Perú interpolado a una grilla regular común de 0.1°x0.1° (grilla de PISCO v2.1) del modelo HadGem2-ES-REMO_Historico	43
Figura 20. Distribución del bias de la precipitación estimada relativo a sus observaciones en el periodo 1981-2000 (HadGem2-ES-REMO).....	44
Figura 21. Comportamiento del ciclo anual medio de precipitación del modelo HadGem2-ES-REMO_Historico	45
Figura 22. Delimitación de hidrográfica de subcuencas	48
Figura 23. Esquema del modelo	50
Figura 24. Subcuencas del esquema del modelo	50
Figura 25. Caudales observados y simulados para el período de calibración y validación	54
Figura 26. Caudal (Q) observado y simulado: a. Calibración y b. Validación	54
Figura 27. Análisis comparativo entre la precipitación del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-AO	56
Figura 28. (a) y (b) Variación de la precipitación para el modelo HadGem2-AO escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5	57
Figura 29. Análisis comparativo entre la temperatura del periodo de referencia y de los escenarios para el modelo HadGem2-AO	58
Figura 30. (a) y (b) Variación de la temperatura para el modelo HadGem2-AO bajo el escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5	59
Figura 31. Caudal medio anual para el periodo 1981-2000	60

Figura 32. Caudal medio anual para el periodo 2021-2060	61
Figura 33. Caudal medio anual para el periodo 2021-2060	62
Figura 34. Análisis comparativo entre el caudal del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-AO	63
Figura 35. (a) y (b)Variación del caudal para el modelo HadGem2-AO bajo el escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5	64
Figura 36. Escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2021-2040.....	66
Figura 37. Escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2041-2060.....	67

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo determinar la influencia del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas. Para este fin se empleó el modelo hidrológico “WEAP” por el método de humedad de suelo. Para la calibración y validación fueron ingresados datos climáticos y parámetros de uso de suelo obteniéndose un óptimo ajuste entre los caudales simulados y observados en la estación hidrométrica La Achirana. El análisis del comportamiento futuro de la precipitación y temperatura fue realizado con información de los modelos globales del CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) y los modelos regionalizados de CORDEX (HadGem2-ES - REMO y MPI-ESM-LR - REMO) bajo un escenario de bajas emisiones (RCP 2.6) y de altas emisiones (RCP 8.5). Dicha información fue interpolada a una grilla regular común de $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (resolución de PISCO v2.1) mediante el método de interpolación bilineal y posteriormente pasó un proceso de corrección del error sistemático (bias) a través del método Scaling. Para analizar la influencia del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca se estimaron los cambios de los ocho escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para los periodos 2021-2040 y 2041-2060, tomando como referencia el periodo histórico 1981-2000. Los resultados mostraron que el cambio climático influye en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto pampas con la disminución de los caudales para todos los escenarios y los periodos analizados.

Palabras clave: WEAP, disponibilidad hídrica, cambio climático, modelos climáticos globales, modelos climáticos regionales.

ABSTRACT

The aim of the current research was to determine the influence of climate change on water resources availability over the Ica-Alto Pampas Basin. For this purpose, the hydrological model "WEAP" was used by the soil moisture method. In the calibration and validation phase, climate data and land-use parameters were used as input, obtaining an optimal fit between the simulated and observed flows of the La Achirana hydrometric station. The assessment of the future precipitation and temperature was carried out using information from global models of CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) and downscaled models of CORDEX (HadGem2-ES-REMO and MPI-ESM-LR-REMO) under a low-emissions scenario (RCP 2.6) and high-emissions scenario (RCP 8.5). This model data base was interpolated to a common regular grid of $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (PISCO v2.1 spatial resolution) applying a bilinear interpolation method and then, the bias was corrected using the Scaling method. Influence of climate change on the water supply of the basin was assessed by estimating the changes of the eight hydrological scenarios projected in the La Achirana station for the periods 2021-2040 and 2041-2060, with the period of 1981–2000 as the reference. Results showed that climate change influences the water resources availability in the Ica-Alto Pampas basin with the reduction in flows for all scenarios and periods assessed.

Keywords: WEAP, water availability, climate change, global climate models, regional climate models.

I. INTRODUCCIÓN

“El Perú es un país con poblaciones y ecosistemas altamente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático”. El Perú cuenta con la cordillera de los andes, la corriente Oceánica Peruana, la corriente del Niño, la zona de convergencia intertropical, el anticiclón del Pacífico Sur y del Atlántico Sur considerados elementos en los que el cambio climático influye produciendo una variedad de climas y microclimas. Cada año las condiciones climáticas sufren alteraciones, esto genera diversos impactos en el planeta, donde el ciclo hidrológico podría ser alterado por el cambio climático; la cantidad, la intensidad y la distribución temporal de las precipitaciones presentarían cambios, a menor precipitación pluviométrica, menor será la cantidad de agua que se escurre sobre la cuenca por consiguiente se dispondrá de menor cantidad de recurso hídrico [1].

Existe una gran variedad de modelos disponible que considera la Asociación Mundial para el Agua (GWP) para llevar a cabo la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Para el presente estudio se empleó el modelo hidrológico Water Evaluation And Planning System (WEAP) - “Método de humedad del suelo”, que permite determinar el comportamiento hidrológico y la planificación de los recursos hídricos en el futuro; es decir, predecir los cambios de oferta y demanda de agua; y desarrollar alternativas de aprovechamiento hídrico para la gestión integrada de recursos hídricos, convirtiéndola en un instrumento para desarrollar estudios de cambio climático. La simulación hidrológica con WEAP requiere datos de entrada para cada catchment: datos climatológicos, de cobertura vegetal y de caudales observados para posteriormente compararlos con los caudales simulados y realizar la calibración del modelo [2].

Unos de los efectos del peligro asociado al cambio climático es la disponibilidad hídrica, la cual se ve influenciada por las variaciones de la temperatura, precipitación y eventos extremos intensificados de origen hidrometeorológico, afectando los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad. Por otro lado, el 1.8% del agua fluye por la vertiente del Pacífico, donde reside el 70% de la población y hay actividad agroexportadora (con altas demandas de agua). Finalmente, el 0.5% del agua desemboca en la vertiente del Titicaca, donde reside el 4% de la población. Lo cual demuestra que los espacios andinos y costeros poseen un volumen limitado de agua, presentando una escasez del recurso hídrico.

Así mismo, la disponibilidad insuficiente de agua por un periodo extenso puede originarse por un evento extremo hidrometeorológico: la sequía, la cual predomina en la zona andina sur del Perú, como consecuencia se ve afectada la agricultura, ganadería y la seguridad alimentaria [3].

Es por ello que se usó modelos climáticos también llamados modelos de circulación general (MCG), que acoplan (atmosfera, océano y suelo) y estiman las alteraciones de las variables en el tiempo, considerados como herramienta que simula la respuesta del sistema climático global al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), otorgando una representación completa [4]. Dichos modelos a escala global pueden otorgar series futuras de precipitación y temperatura sobre un área extensa sin embargo para estudios de zonas específicas se utiliza un modelo regional, el cual puede determinar el clima de un área mediante técnicas de "downscaling" o "cambio de escala" [5]. Es el caso del programa "Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment" (CORDEX), creado por iniciativa del World Climate Research Programme (WRCP), que tiene como objeto la evaluación y mejora en la generación de proyecciones climáticas a escala regional en todo el mundo [6]. El programa CORDEX ha generado información a diferentes resoluciones: 0. 11°, 0. 22° y 0.44 ° para doce dominios o regiones y múltiples combinaciones de MCG y MCR.

En la presente investigación se analizó la influencia del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca del río Ica para todos los escenarios, mediante el empleo del modelo hidrológico "WEAP" por el método de humedad de suelo utilizando información climática de los modelos globales del CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) y los modelos regionalizados de CORDEX (HadGem2-ES - REMO y MPI-ESM-LR - REMO) para dos escenarios de emisión: un escenario de bajas emisiones (RCP 2.6) y otro de altas emisiones (RCP 8.5), para determinar los caudales futuros en los periodos 2021-2040 y 2041-2060.

1.1 Realidad problemática

La cuenca integrada o birregional río Ica - Alto Pampas se ubica entre las regiones de Ica y Huancavelica, consta de dos espacios interconectados por una obra de trasvase de agua superficial: Sistema Choclococha, el cual comprende embalses y obras hidráulicas (Laguna Orcococha, embalses Choclococha y Ccaracocha y Canal Colector Choclococha) permitiendo la derivación trasandina de los recursos hídricos superficiales de una parte de la cuenca alta del río Pampas hacia la cuenca del río Ica, en épocas de estiaje, para regar el valle de Ica, dado que el río Ica presenta descargas irregulares a lo largo del año, de escasa lluvia y depende de las precipitaciones que se concentran en la zona altoandina (parte alta de la cuenca), políticamente en Huancavelica.

En la cuenca baja, se ubican los acuíferos de Ica, Villacurí y Pampa de Lanchas, donde la creciente demanda de agua subterránea para el cultivo de espárrago y otros productos incrementó la sobreexplotación del acuífero. Por ello es relevante realizar una buena planificación y regulación del recurso hídrico a disponer en escenarios actuales y futuros.

Problema general:

- ¿En qué medida influye el cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas?

Problemas específicos:

- ¿En qué medida influye el cambio climático en las variables climatológicas de la cuenca río Ica-Alto Pampas?
- ¿En qué medida influyen los parámetros del método de humedad de suelo para la calibración y validación del modelo hidrológico WEAP?
- ¿En qué medida influyen los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas?

1.2 Antecedentes

Antecedentes a nivel internacional

- Lema Changoluisa, M. A., & Plaza Quezada, V. C. (2009). Modelación Hidrológica de la Cuenca Alta y Media del Río Pastaza aplicando el modelo de simulación WEAP (Water Evaluation And Planning System). Quito, Ecuador [7].

El estudio determinó el comportamiento hidrológico de la cuenca Pastaza hasta la junta del río Palora con la aplicación del WEAP, para lo cual analizo las variables hidrometereológicas, pronosticando a futuro los cambios en la disponibilidad de agua con relación a los escenarios de cambio climático.

- Freddy Soria (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales [8].

Desarrolló una guía metodológica para la cuantificación y evaluación de los factores dominantes en la ecuación general de balance hídrico superficial del modelo hidrológico WEAP aplicable a diversas escalas de cuenca. En base a experiencias previas y literatura especializada presentó sugerencias para estimar los parámetros del método de humedad del suelo y el procedimiento para la calibración y evaluar el desempeño del modelo mediante la validación aplicando indicadores estadísticos como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Antecedentes a nivel nacional

- Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Ambiente [9].

Durante el periodo 2010-2015, en el ámbito nacional destaca el estudio de Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en el Perú, a través del cual se obtuvieron proyecciones climáticas locales de las variables de precipitación, temperaturas máximas y mínimas hacia el año 2065 [10]. Mientras tanto, en el ámbito regional, se realizaron proyecciones para las regiones de Áncash, Apurímac, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Ica, Moquegua, Puno, San Martín, Tacna y Ucayali; y a nivel de cuencas, se realizaron proyecciones en los ríos Ica, Mantaro, Pisco, Santo Tomás y Urubamba. Para conocer los posibles impactos del cambio climático en el clima actual y futuro hacia el horizonte en evaluación (2030) emplearon un grupo de 4 modelos climáticos: HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y CCSM4, que representan mejor la distribución espacial de la precipitación en la región Ica y en la cuenca del río Ica, utilizando el escenario de emisión RCP 8.5.

- MPI-ESM-MR: Max Planck Institute – Earth System Model - corriendo en grilla de resolución media (Medium Resolution)
- CCSM 4: Community Climate System Model, version 4, del National Center for Atmospheric Research (NCAR).
- HadGem2-AO: Hadley Global Environment Model 2 – Atmosphere – Ocean (AO).
- HadGem2-ES: Hadley Global Environment Model 2 – Earth System (ES)

En los escenarios climáticos proyectados para la cuenca del río Ica al 2030, la precipitación presentaría disminución de hasta -5.4 %, dichos cambios comprendidos en la variabilidad de +/- 30% para la zona de desierto y de +/- 15% para la zona de los Andes y la puna. Los cambios de las temperaturas máximas y mínimas en un nivel anual de hasta +1.4 °C indicarían una tendencia hacia el calentamiento. En la tabla 1 se señalan los detalles de la metodología utilizada en los escenarios climáticos en este último periodo.

Tabla 1. Escenarios de cambio climático en las cuencas de los ríos Ica y Pisco a 2030

Escenarios de cambio climático en las cuencas de los ríos ICA y Pisco a 2030						
MPI-ESM-ER3, CCSM4-NCAR5, HadGem2-AO6, HadGem2-ES7.	Referencia: 1971-2000	Estadística (de regresión lineal)	A punto de estación	Cuencas de los ríos Ica y Pisco	RCP 8.5	Moderada a alta en el caso de la precipitación. Principalmente en otoño y primavera
	Análisis: 1963-2012					
	Proyecciones 2016-2044.					
	Estación y anual					

Fuente: SENAMHI, 2014

WEAP contiene rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica, convirtiéndola en un instrumento para desarrollar estudios de cambio climático que incorpora la demanda y oferta del agua [2]. Las capacidades del WEAP (Base de datos de balance de agua, Herramienta de generación de escenarios y Herramienta de análisis de políticas) han sido implementadas en diversos estudios nacionales para reforzar la toma de decisiones, como se muestra a continuación:

- Autoridad Nacional del Agua (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pampas. Lima, Perú [11].

El desarrollo del estudio buscó proporcionar los elementos de juicio hidrológicos que asistieran en la toma de decisiones para el mejor aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pampas, para lo cual se evaluó, cuantificó y simuló el comportamiento de los recursos hídricos mediante el modelo hidrológico WEAP, generando caudales en los puntos de control Estación Pampas y Huasapampa obteniendo una buena correspondencia entre los caudales observados y simulados. Estimó la disponibilidad hídrica en los ríos Pampas y Sondondo para el periodo 1965-2009 obteniendo variaciones en el caudal promedio multianual del río Pampas en los meses de febrero y agosto, y para el río Huasapampa en los meses de marzo y agosto.

- Ccori Puma Glorinda Flor (2019). Modelación en WEAP y RS MINERVE para la proyección hidrológica futura de la microcuenca Mchique – Sincos – Huancayo. Lima, Perú [12].

El estudio evaluó los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la microcuenca Mchique mediante dos modelos hidrológicos, el HBV de RS MINERVE y WEAP “método de escorrentía pluvial” usando modelos climáticos globales: CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR para dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en el cual determinó pérdida de caudales según el promedio multianual evaluado en el periodo del 2010 al 2099 para los cuatro escenarios. Dichos resultados a consecuencia de la reducción del 18.69 % en la precipitación y del incremento en 2.10 °C.

Antecedentes a nivel local

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú– SENAMHI, Cooperación Alemana al desarrollo – GIZ (2016). Cambio climático en las cuencas de los Ríos Ica y Pisco: Proyecciones al 2030. Lima, Perú [13].

Presenta los posibles impactos del cambio climático en las cuencas de los Ríos Ica y Pisco, en las cuales se emplearon 4 modelos climáticos globales (HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y CCSM4) para el escenario de emisión RCP 8.5 estimando las proyecciones y cambios de la

precipitación y temperatura para el 2030 en relación al periodo de referencia 1971-2000. Las proyecciones indican que al 2030, en la cuenca del río Ica habrá una reducción en las precipitaciones hasta -5.4% y un calentamiento de +0.5 ° C para la Tmax y de hasta +0.6 ° C para la Tmin.

1.3 Justificación

En el estudio Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pampas realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) recomendó que es necesario realizar la estimación de la oferta hídrica de la cuenca considerando el efecto del cambio climático sobre la lluvia y temperatura con la finalidad de evaluar los escenarios en el futuro. Por lo cual este trabajo se justifica por la necesidad de conocer la disponibilidad hídrica en escenarios actuales y futuro bajo la influencia del cambio climático, en vista que no se ha publicado algún estudio realizado en la cuenca del río Ica-Alto Pampas.

La importancia de este trabajo de investigación está en el uso de los modelos climáticos con la finalidad de determinar la influencia del cambio climático en el recurso hídrico de la cuenca en estudio. Además, que cada año las condiciones climáticas sufren alteraciones, esto genera diversos impactos en el planeta, dentro del ámbito del ciclo hidrológico, variando las precipitaciones y con ello caudales de río, incrementando la intensidad de eventos hidrológicos. El principal factor en alterar las condiciones climáticas son los gases de efecto invernadero en diversos porcentajes por periodos, por ello hay acciones que realizan entidades científicas con el fin de determinar el impacto del cambio climático mediante la aplicación de modelos climáticos a partir del uso de datos históricos generando escenarios futuros para poder tener mayor entendimiento de los peligros que generaría dicho impacto.

1.4 Objetivos de la investigación

Siendo el objetivo de la investigación la meta general a la cual debe llegarse, se estableció el Objetivo general: Determinar la influencia del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas aplicando el modelo hidrológico WEAP. Del mismo modo, se estableció los objetivos específicos: Determinar la influencia del cambio climático en las variables climatológicas de la cuenca río Ica-Alto Pampas; Determinar la influencia de los parámetros del método de humedad de suelo para la calibración y validación del modelo hidrológico WEAP y Determinar la influencia de los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, en los periodos 2021-2040 y 2041-2060.

1.5 Hipótesis de investigación

Habiéndose desarrollado una investigación con enfoque cuantitativo, pero no experimental, si ha sido posible plantear hipótesis de trabajo a ser contrastadas, en ese sentido se cuenta con una Hipótesis General: “El cambio climático influye fuertemente en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas. Y esto genera que se presenten las siguientes hipótesis específicas: “El cambio climático influye en las variables climatológicas de la cuenca río Ica-Alto Pampas”; “Los parámetros del método de humedad de suelo influyen decididamente en la calibración y validación del modelo hidrológico WEAP” y “Los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 influyen directamente en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, para los periodos 2021-2040 y 2041-2060”.

El contenido del presente trabajo de investigación se desarrolla en capítulos: En el Capítulo I, se presenta la Introducción de la tesis, que contiene los aspectos generales y específicos del tema investigado, se inicia abordando aspectos científicos vinculados a la investigación, se describe la realidad problemática, citando y comentando investigaciones recientemente realizadas (antecedentes) y justificando la necesidad de realizar la investigación. Asimismo, señalamos los objetivos y las hipótesis utilizadas. En el Capítulo II, se describe la metodología y las técnicas de recolección de datos empleadas. En el Capítulo III, se presentan los resultados obtenidos con la aplicación del modelo hidrológico. En el Capítulo IV, se realiza la discusión de los resultados teniendo en cuenta los valores encontrados en los antecedentes y los valores mencionados por la teoría. En el Capítulo V, se presentan las conclusiones. En el Capítulo VI, se presentan las recomendaciones. En el Capítulo VII, se presentan las referencias bibliográficas y finalmente en el Capítulo VIII, se presentan los anexos.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1 Delimitación de la investigación

2.1.1 Delimitación espacial

El área de estudio abarca la parte alta de la cuenca del río Ica. Comprende los ríos Tambo, Santiago e Ica, hasta la estación hidrométrica La Achirana.

2.1.2 Delimitación temporal

La presente investigación inició en el mes de agosto del año 2021 y culminó en enero del 2022.

2.1.3 Delimitación social

La investigación es de interés para los actores sociales de la cuenca en estudio como son: las comunidades de Tambo-Santiago, el valle de Ica, la junta de usuarios de agua de la cuenca del río Ica – JUACRI y la junta de usuarios del subdistrito de riego La Achirana, Santiago de Chocorvos. Ambas juntas usan en forma alternada el agua regulada de Choclococha, que transita por el río, de setiembre noviembre.

2.1.4 Delimitación conceptual

Modelo Hidrológico WEAP, modelos climáticos globales, PISCO desarrollado por SENAMHI, cambio climático.

2.2 Diseño Metodológico

2.2.1 Diseño de investigación

En el presente estudio de investigación el diseño es no experimental constatar las características del problema en investigación, sino fundamentalmente explicar y brindar alternativas de solución a las causas y factores que los genera y a las consecuencias que se producen, en la zona de análisis. La investigación no experimental, es aquella que se realiza sin manipular deliberadamente variables y en la que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos.

2.2.2 Tipo y Nivel de investigación

- Tipo

Investigación aplicada o tecnológica con enfoque cuantitativo y transversal.

La investigación aplicada se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. En general, está orientado a resolver problemas de la vida cotidiana o a controlar situaciones prácticas [14].

Enfoque cuantitativo, emplea la recolección y análisis de datos para probar la hipótesis de investigación y transversal, por su alcance temporal.

- Nivel

El presente trabajo se desarrolló a un nivel descriptivo, donde se obtendrán datos requeridos para la aplicación del modelamiento hidrológico, con la finalidad de poder crear escenarios actuales y futuros con relación a la problemática mencionada.

Investigación descriptiva, comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos, es decir al recolectar datos sobre cada una de las variables y reportar los datos que obtienen, caracterizándose fundamentalmente por presentar una interpretación correcta [15].

2.2.3 Población y muestra

- Población de estudio

La unidad hidrológica: Cuenca integrada del río Ica-Alto Pampas

“La población es un conjunto de unidades usualmente personas, objetos, transacciones o eventos; en los que estamos interesados en estudiar” [16].

Compuesta por todos los elementos que participan del evento que fue definido y delimitado en el análisis del problema de investigación, en torno a sus características de contenido, lugar y tiempo.

- Tamaño de la muestra

La muestra son los ríos Tambo, Santiago e Ica, hasta la estación hidrométrica La Achirana.

2.2.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Se empleó documentos y registros. Para seleccionar las estaciones hidrometeorológicas e hidrométricas y poder recolectar información de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y caudal de la base datos del SENAMHI y de la ANA, se tuvo en cuenta los registros con mayor información histórica. Para identificar documentos relacionados al tema de la presente investigación se empleó la ficha que se muestra en la figura 1.

Ficha de análisis documental	
Nombre del documento	
Autor	
Referencia según IEEE	
Numero de paginas	
Palabras clave de texto	
URL	
Descripción del aporte al tema seleccionado	

Figura 1. Ficha para recolección de dato documentales

FICHA DE CAMPO									
Proyecto de investigación:	“Influencia del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, aplicando el modelo hidrológico WEAP, 2021”								
Ubicación: _____	<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="padding: 5px;">Coordenadas Utm-WGS84</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Este</td> <td style="width: 50px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Norte</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Altitud</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Coordenadas Utm-WGS84		Este		Norte		Altitud	
Coordenadas Utm-WGS84									
Este									
Norte									
Altitud									
Departamento: _____									
Provincia: _____									
Distrito: _____									
Fotografía									
Descripción									

Figura 2. Ficha de campo

Para la visita de campo se empleó la ficha que se muestra en la figura 2 con la cual se describió los lugares ubicados en la parte alta, media y baja de la cuenca en estudio con coordenadas UTM y con tomas fotográficas.

Las técnicas de recolección de datos empleadas en la presente investigación es la observación de campo no experimental y el análisis documental.

2.3 Secuencia metodológica

Se muestra el flujograma de la metodología que se empleó en la presente investigación

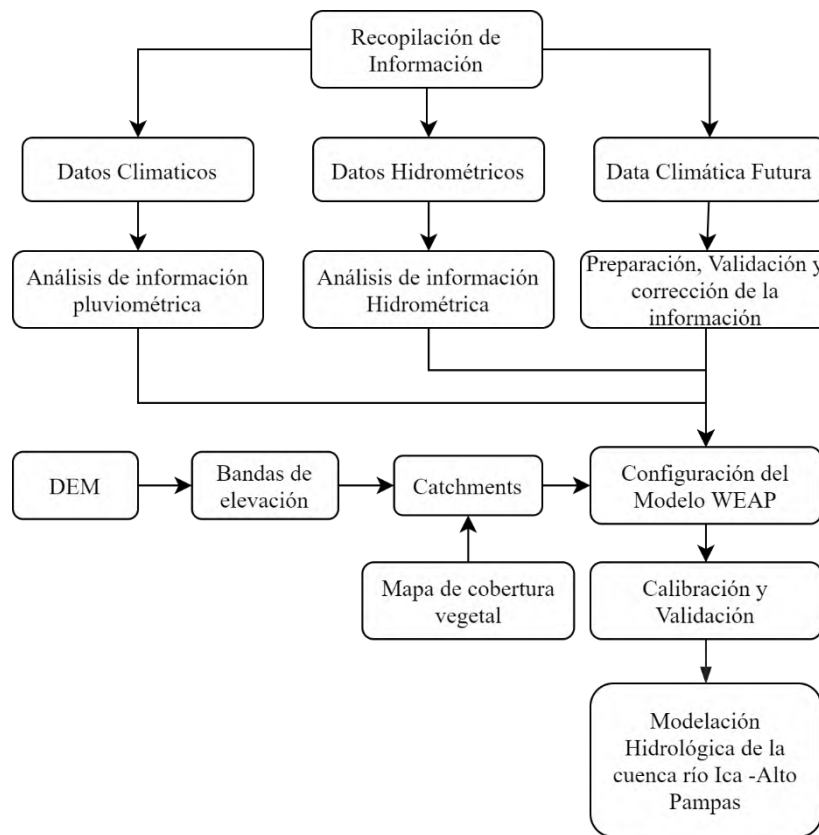


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico

2.3.1 Recopilación de Información

2.3.1.1 Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Ica se ubica en la vertiente del Pacífico; políticamente, se ubica en la zona central del departamento de Ica, su río principal el “Río Ica”, nace de la unión de los ríos Tambo y Santiago. En su recorrido el Río Ica recibe aportes de las quebradas Haccyoc (70 km²), Tambillos (254 km²), Trapiche (125 km²), Cansas (176 km²), Yauca del Rosario (970 km²) y Tingue (491 km²). El río Ica desemboca en el océano después de una longitud de 220 km. [17]. Tiene un área de 7 711km², con una pendiente promedio de 5 %, longitud de cauce de 220 km, índice de compacidad de 1,53 y un factor de forma de 0,12.

La Cuenca río Pampas está formada por los ríos Alto Pampas, Caracha, Sondondo, Chicha, Torobamba y Bajo Pampas, unidades hidrográficas y principales afluentes de la misma. Tiene un área total de 23 236,37 km², desde su nacimiento en la laguna Choclococha hasta su desembocadura en la margen izquierda del río Apurímac [11]. La Sub Cuenca Alto Pampas, unidad hidrográfica

y uno de los principales afluentes de la Cuenca Rio Pampas, se ubica en la vertiente del Amazonas; políticamente, se ubica en la sierra central en las provincias de Castrovirreyna y Huaytará, sur del Perú. Tiene un área de 3 734 km², con una altitud media de 4 500 m.s.n.m, pendiente de cauce de 1,48%, longitud de cauce de 124 km, índice de compacidad de 1,81 y un factor de forma de 0,24. Comprendiendo un área de captación de precipitaciones mayor a la de la cuenca del río Ica [11].

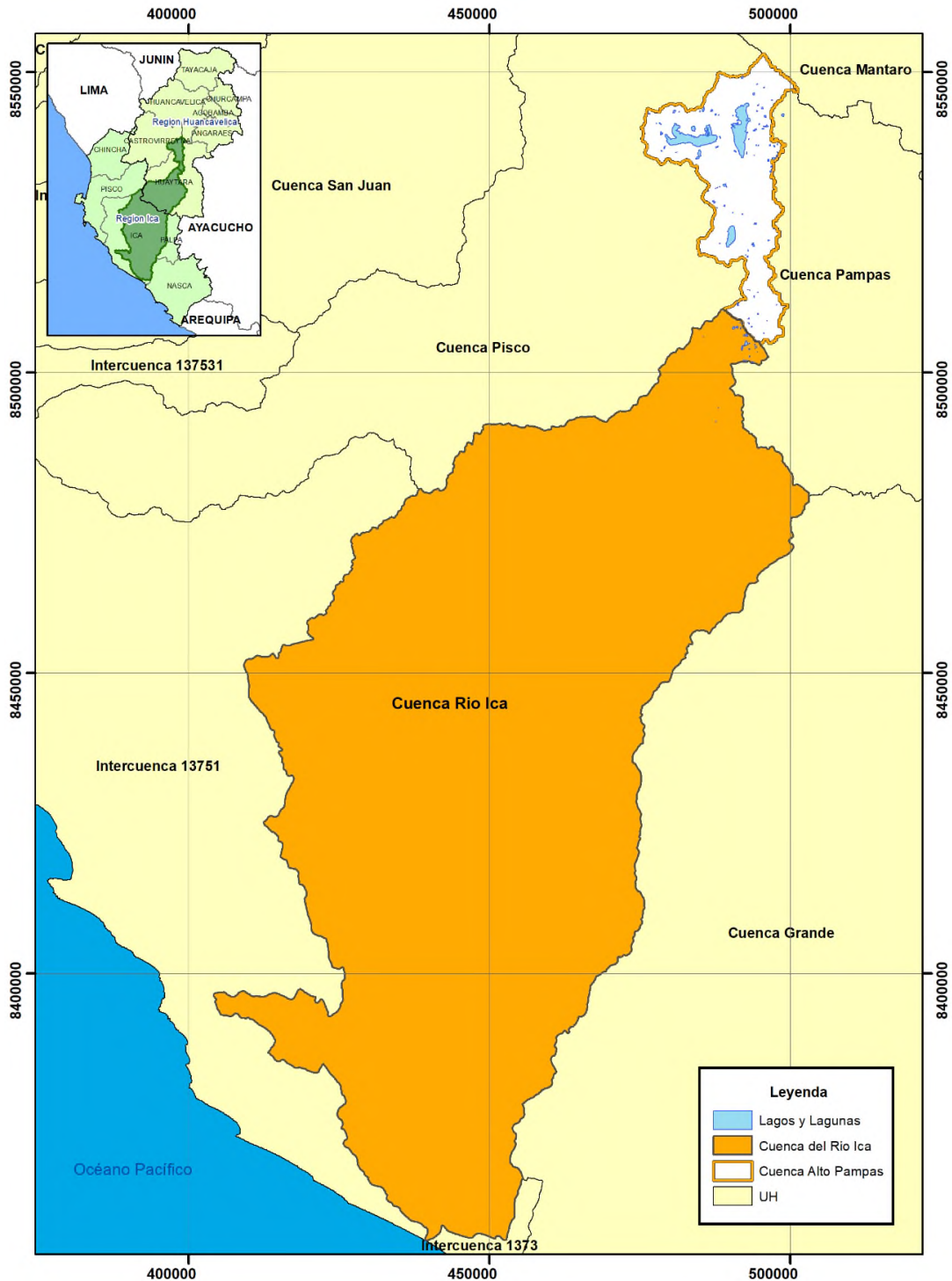


Figura 4. Ubicación geográfica de la cuenca integrada
Fuente: Elaboración Propia

Climatología

El clima de la cuenca del río Ica es influenciado por el Fenómeno El Niño, la Corriente de Humboldt y la Cordillera de los Andes. Las interacciones de estos tres factores determinan que cuando la masa de aire frío con su contenido de vapor de agua, se encuentra con presiones más bajas, se expanda aumentando su volumen produciéndose un enfriamiento hasta alcanzar la condensación del vapor de agua formando las nubes. Así mismo, los vientos húmedos que proceden del pacífico al chocar con una barrera (La Cordillera de los Andes), origina que suban y que la humedad se condense, generando precipitaciones del lado de Perú [18].

En general, desde la costa hasta los 2500 msnm presenta un clima cálido y seco acentuado por las elevadas temperaturas, con precipitaciones estacionales (de enero a marzo). En la parte baja de la cuenca, en verano, las temperaturas ascienden hasta los 33°C y una temperatura media de 27 °C y en invierno de 18 °C. Una particularidad de su clima en la cuenca baja son los fuertes vientos denominados "paracas", que originan grandes tormentas de arena formando un relieve topográfico semidesértico. La humedad relativa es 70% en la Costa y 65% en la sierra. Los vientos registrados alcanzan una velocidad máxima promedio de 6 m/s. En la parte alta de la cuenca, desde los 2500 msnm presenta un clima muy húmedo, con ocurrencia de precipitaciones en el sistema Choclococha y en toda la vertiente del atlántico a partir de octubre hasta abril, alcanzando su valor máximo en los meses de febrero. La temperatura va disminuyendo desde los 21°C hasta llegar a 0°C con una humedad relativa de 65%. Desde los 3 200 hasta 3800 msnm, presenta un clima sub-húmedo y frío, con una temperatura promedio anual de 11 °C, con ocurrencia de heladas y la humedad relativa es 65 a 67%. A partir de los 3800 hasta los 4600 msnm, las temperaturas son bajas, una temperatura promedio anual de 6.6 °C y la humedad relativa es 68%. Los vientos en la zona alcanzan un promedio entre 3.05 y 1.59 m/s y los vientos más fuertes un valor promedio de 8.83 m/s [18].

Topografía y Suelos

La topografía de la parte alta de la cuenca es accidentada, con fuerte pendiente, fondo profundo, con poca retención de humedad y forma alargada, estas características propician la ocurrencia de torrentes. También se caracteriza por la presencia de altiplanicies, montañas, serranías y cadenas de cerros bajos. Erosionado por ríos y quebradas, con valles en secciones en forma de "V" y "U". En la parte media de la cuenca, presenta una topografía que varía de llana hasta escarpado, la pendiente es menor, produciendo una disminución de la velocidad del río depositando en forma gradual material rocoso y gravas constituyendo el cono de deyección del río Ica. La cuenca baja presenta una topografía llana, relieve plano a moderado, la pendiente disminuye entre 0.3% a 1.5%, con predisposición ascendente al este. Se caracteriza por la presencia de colinas, lomas,

terrazas de erosión, cerros bajos, sedimentación y cauces antiguos formadas por los Depósitos eólicos, materiales lacustres y depósitos aluviales en la llanura Aluvial y la pampa Costanera [18].

2.3.1.2 Información Hidrometeorológica

La red de estaciones hidrometeorológicas consideradas para el modelo hidrológico WEAP de la cuenca río Ica se ubican dentro de la misma y en cuencas vecinas. La información meteorológica fue encontrada a nivel diario en la web de SENAMHI y procesada a nivel mensual. En el caso de la información hidrométrica fue proporcionada a nivel mensual por la Administración Local de Agua Ica. En la Tabla 3 se muestra la relación de estaciones hidrometeorológicas que se encuentran en el área de estudio y en la figura 6 se presenta la ubicación de las estaciones.

- Precipitación

Los registros pluviométricos de las estaciones meteorológicas corresponden al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Los datos registrados de 15 estaciones meteorológicas se obtuvieron a escala diaria a partir del año 1964, procesándose a escala mayor como precipitación total mensual. Sin embargo, la disponibilidad de información es escasa en la parte media de la cuenca dado que algunas estaciones no cuentan con periodos continuos de datos, tal como se muestra en la Tabla 3.

- Temperatura

Los Registros de temperatura se encontraron a escala diaria, procesados para obtener datos de temperaturas medias mensuales. Se obtuvo información de 12 estaciones.

- Humedad Relativa

La información disponible de humedad relativa se obtuvo de las estaciones Tambo, Challaca, Túnel Cero, San Camilo a escala diaria. Dicho registro comprende el periodo 1964-1970.

- Velocidad del Viento

Los registros de velocidad del viento pertenecen a 11 estaciones obtenidas a escala diaria.

- Caudales

La información hidrométrica de la estación La Achirana, ubicada en la parte media alta de la cuenca Río Ica, se obtuvo de la Administración Local de Agua Ica. Según el PROFODUA [19], dicha estación no discretiza en su mayoría de años las descargas reguladas del Sistema

Choclococha, por lo cual desarrollaron un trabajo de naturalización de caudales, es decir discretizaron los caudales propios del río Ica.

En el presente trabajo se empleó los caudales propios del río Ica (m³/s) registrados en la estación La Achirana en el periodo histórico 1964-2005, para la calibración y validación del modelo hidrológico WEAP. Los caudales provenientes del sistema Choclococha no se consideraron dado que la estación hidrométrica Pariona solo registró datos hasta 1969.

2.3.1.3 Información climática futura

Para el análisis del clima futuro, se ha considerado los datos provenientes de dos modelos de circulación general (HadGem2-AO y MPI-ESM-MR) y del proyecto CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment), se utilizó simulaciones de modelos climáticos regionales (RCMs por sus siglas en inglés) forzados con datos de dos modelos de circulación general (HadGem2-ES y MPI-ESM-LR), para dos escenarios emisión (RCP2.6 y RCP8.5).

Dichos modelos presentan información de clima histórico y futuro, recopilada desde la base de datos del Earth System Grid Federation (ESGF por sus siglas en inglés) y disponible en el siguiente enlace: <https://esgf-node.llnl.gov/search/esgf-llnl/>, para las variables de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa. Los modelos utilizados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos climáticos globales y regionalizados para la cuenca del río Ica

Instituto	Modelo Global	Modelo Regional	Periodo Analizado
MOHC	HadGem2-ES	REMO2015	Histórico :1981-2000 Futuro: 2021-2060
MPI	MPI-ESM-LR	REMO2015	
MOHC	HadGem2-AO	-	
MPI	MPI-ESM-MR	-	

La información de RCM's cuentan con resolución espacial de 0.22° aproximadamente.

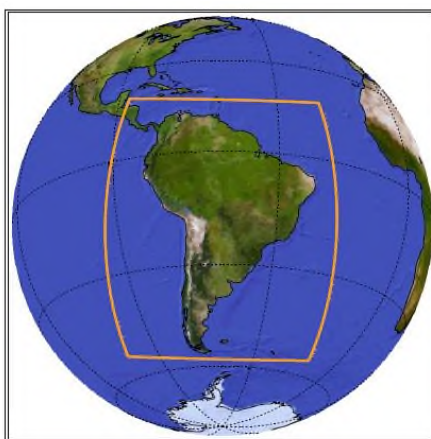


Figura 5. Dominio sobre Sur América
Fuente: WCRP CORDEX

Tabla 3. Estaciones hidrometeorológicas

N°	Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud msnm	Dpto.	Prov.	Dist.	Variable				
									Q(m3/s)	P(mm)	T(°C)	Vv(m/s)	Hr (%)
1	La Achirana	LIM	13° 55' 29"	75° 40' 43"	489	Ica	Ica	San José de Los Molinos	x				
2	Ocucaje	CO	14° 22' 42.2"	75° 40' 55.4"	324	Ica	Ica	Ocucaje		x	x	x	
3	San Camilo	MAP	14° 4' 23.91"	75° 42' 39.63"	407	Ica	Ica	Parcona		x	x	x	x
4	Huamani	CO	13° 50' 34.8"	75° 36' 25.33"	790	Ica	Ica	San José de Los Molinos		x	x	x	
5	Tambo	CO	13° 41' 29.86"	75° 16' 27.05"	3138	Huancavelica	Huaytara	Tambo		x	x	x	x
6	Santiago De Chocorvos	CO	13° 49' 59.1"	75° 15' 3"	2700	Huancavelica	Huaytara	Santiago de Chocorvos		x	x	x	
7	Cusicancha	CO	13° 30' 14.35"	75° 17' 46.5"	3253	Huancavelica	Huaytara	San Antonio de Cusicancha		x	x	x	
8	Challaca	CO	13° 47' 25.68"	75° 22' 55.64"	1800	Huancavelica	Huaytara	Santiago de Chocorvos		x	x	x	x
9	Acora	CO	13° 47' 1"	75° 22' 1"	2114	Huancavelica	Huaytara	San Francisco de Sangayaico		x	x	x	
10	Pariona	PLU	13° 32' 1"	75° 4' 1"	4425	Huancavelica	Huaytara	Santo Domingo de Capillas		x	x		
11	San Juan De Huirpacancha	PLU	13° 57' 1"	75° 14' 1"	3650	Huancavelica	Huaytara	San Isidro		x			
12	Malluchimpana	PLU	14° 6' 1"	75° 17' 1"	2525	Ica	Ica	Yauca del Rosario		x			
13	Córdova	PLU	14° 2' 26.19"	75° 11' 13.11"	3225	Huancavelica	Huaytara	Córdova		x			
14	Túnel Cero	CO	13° 15' 33.54"	75° 5' 9.46"	4498	Huancavelica	Huaytara	Pilpichaca		x	x	x	x
15	Acnocochoa	CO	13° 13' 1"	75° 5' 1"	4520	Huancavelica	Huaytara	Pilpichaca		x	x	x	
16	Choclococha	CO	13° 6' 31.69"	75° 4' 17.22"	4547	Huancavelica	Castrovirreyna	Santa Ana		x	x	x	

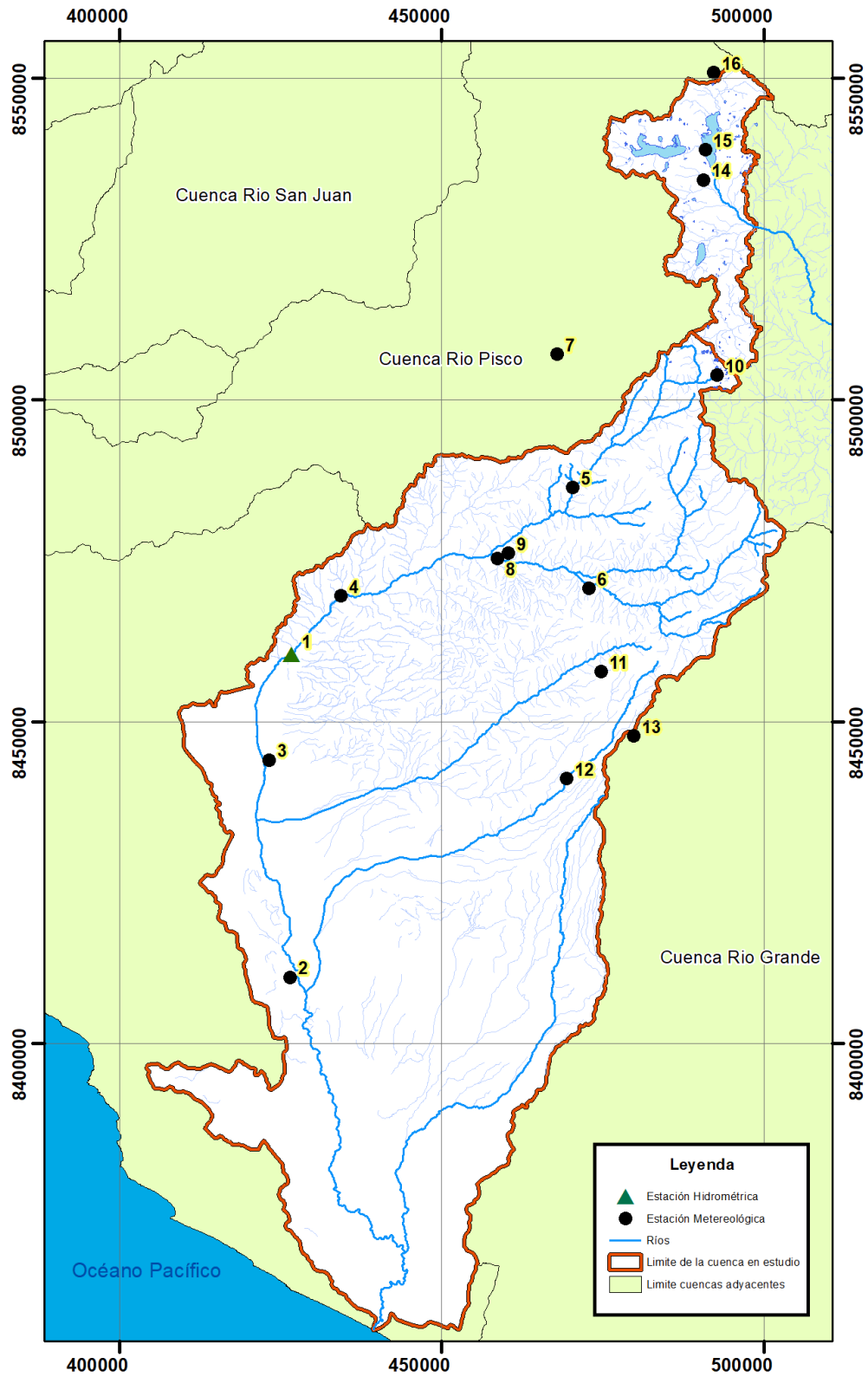


Figura 6. Estaciones hidrometeorológicas
Fuente: Elaboración Propia

2.3.2 Análisis de información pluviométrica

Consistió en realizar análisis de consistencia y homogeneidad de los registros que se tienen, para poder detectar los datos atípicos. El análisis se desarrolló mediante técnicas graficas antes de aplicar cualquier técnica estadística. sea por causas naturales u ocasionadas por la intervención de la mano del hombre.

Para construir el modelo se analizó los datos de precipitación a partir de diferentes métodos estadísticos y de acuerdo a la complejidad del estudio los datos de entrada son a escala mensual. La selección del periodo a analizar se definió en función de la disponibilidad de información de las estaciones ubicadas en la cuenca río Ica-Alto Pampas y fuera de los límites de la misma por su semejanza en altitud y régimen de precipitación.

2.3.2.1 Diagrama de cajas

Llamada también boxplot, permite obtener visualmente la concentración y variación de los datos. Su distribución por cuartiles proporciona una visión general de los datos, muestra la media, la mediana, la simetría de los datos y los valores atípicos. La caja comprende el 50 % de los datos y sus límites superior e inferior indican el rango intercuartílico, 75% y 25% respectivamente. Las líneas que se extienden desde la caja se conocen como bigotes representan los valores que se encuentran fuera del rango intercuartílico [20].

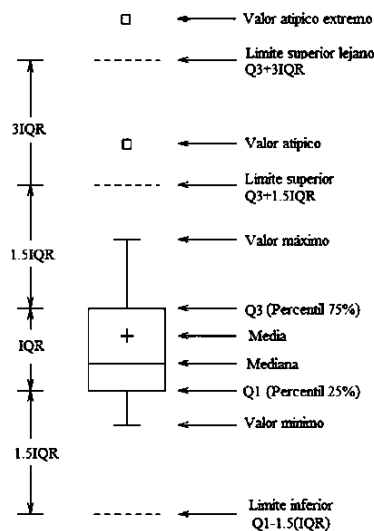


Figura 7. Partes de un diagrama de caja

En la figura 8, se muestra el diagrama de cajas de la variable precipitación a nivel anual para el periodo de 1964 al 2018. Los registros pertenecientes a las estaciones de Ocucaje, San camilo y Huamani presentan valores nulos en la mayoría de los años mientras que en las demás estaciones presentan valores atípicos debido a los años húmedos y secos.

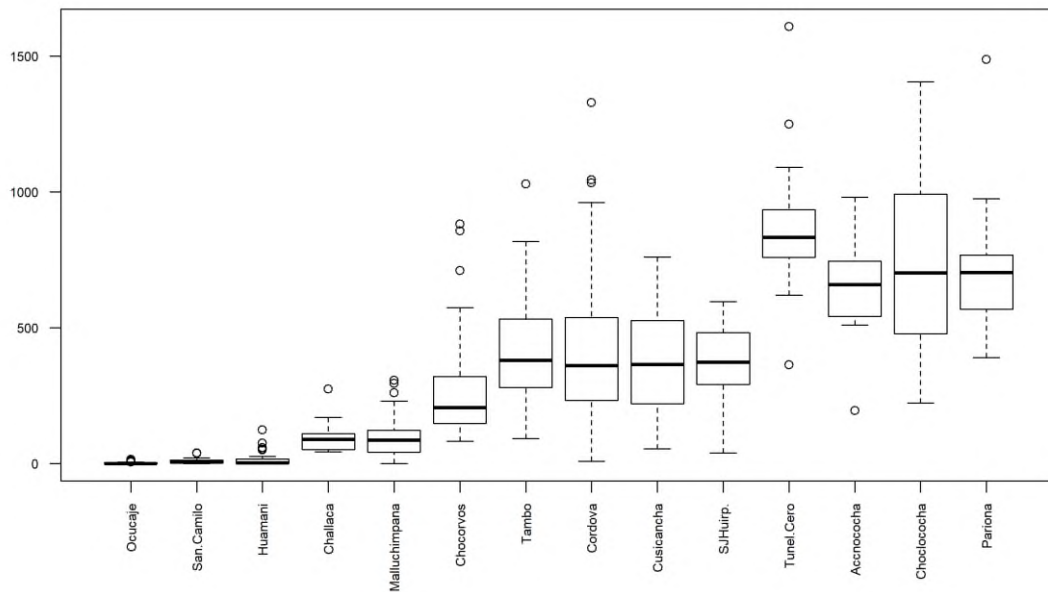


Figura 8. Diagrama de Cajas Estación Precipitación

2.3.2.2 Análisis gráfico

Se analizó el histograma a nivel mensual de la precipitación, dicho grafico sirve para ver la consistencia de la información hidrológica de manera visual, a fin de detectar posibles saltos y/o tendencias durante el período de información registrada.

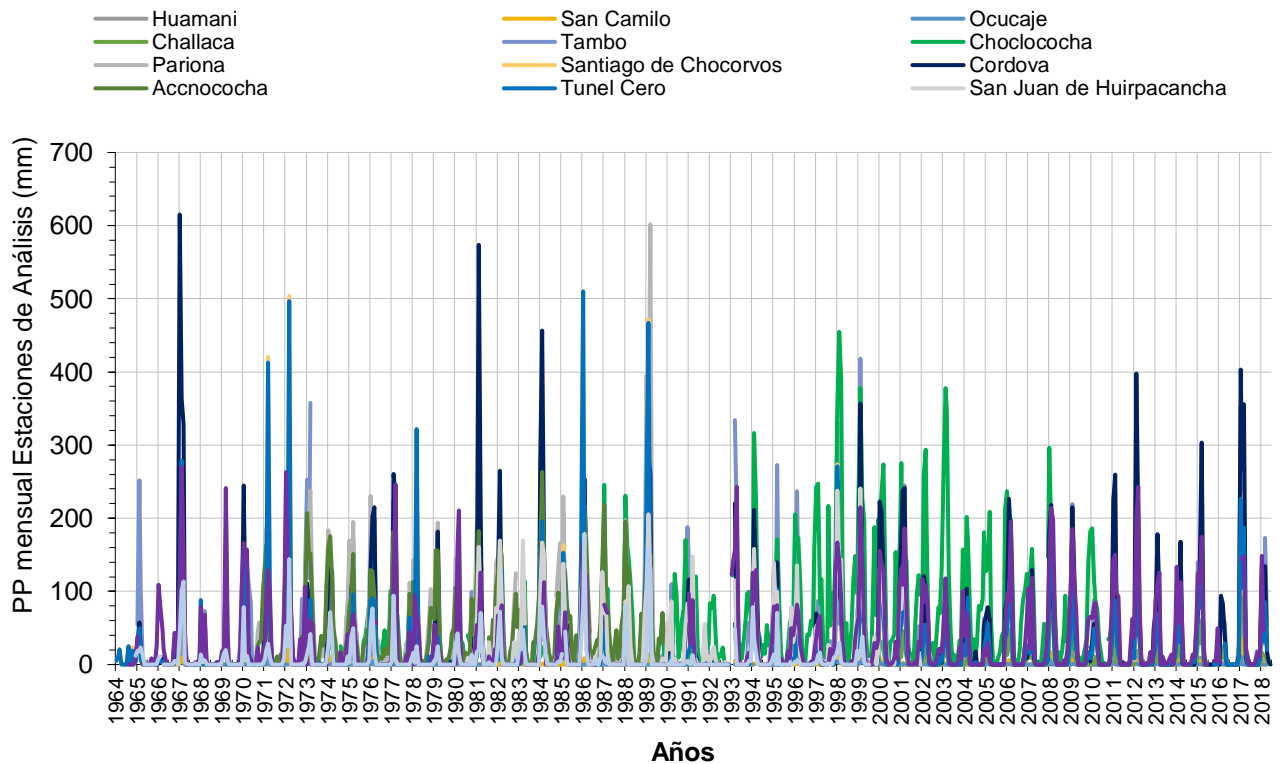


Figura 9. Histograma de Precipitación Total Mensual Histórica.

El histograma muestra la distribución temporal de la precipitación a nivel mensual, con la finalidad de identificar posibles saltos, tendencias o valores atípicos durante el periodo de registro de datos pluviométricos. En la figura 9, se visualiza que las 14 estaciones poseen equivalente variación temporal de la precipitación mensual, años húmedos y años secos concurrentes, salvo algunos periodos que podrían presentar saltos.

2.3.2.3 Análisis de consistencia

Para realizar el análisis de consistencia se realizó primero la completación y extensión de los datos mensuales faltantes a un periodo común (1964-2018), para lo cual se utilizó el software HEC4 - Monthly stream Flow simulation del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica. El software consiste en un modelo de regresión múltiple mediante una correlación espacial, es decir completa los registros mediante una regresión lineal múltiple apoyándose en los registros de las otras estaciones cercanas hasta un máximo de 10 y teniendo en cuenta el nivel de correlación que existe entre los valores.

Para efectos de completación y extensión de datos con el software HEC4, previamente las estaciones fueron agrupadas por zonas climáticas homogéneas, es decir por similitud de condiciones de clima, ubicadas mediante el empleo del Mapa climático del Perú, para luego completar y extender por grupo mediante el HEC4.

a. Método de agrupación jerárquica

Se empleó el software Past3 para el uso del algoritmo de agrupación por jerarquías o Hierarchical Clustering, donde los clusters se crean de manera que tengan un orden predeterminado, es decir, una jerarquía; son de dos tipos método divisivo o método aglomerativo. En esta investigación se utilizó el método aglomerativo donde a cada observación se asigna su propio cluster; luego se calcula la distancia entre cada uno de los clusters usando la función euclidiana y el par más cercano se unifica, repitiéndose hasta que se obtenga un grupo. La agrupación de las estaciones se realizó mediante la correlación entre la precipitación total multianual de cada una de las estaciones pluviométricas y sus referentes elevaciones. De la figura 11, nos muestra 4 grupos, los cuales poseen un comportamiento pluviométrico similar en relación a la elevación.

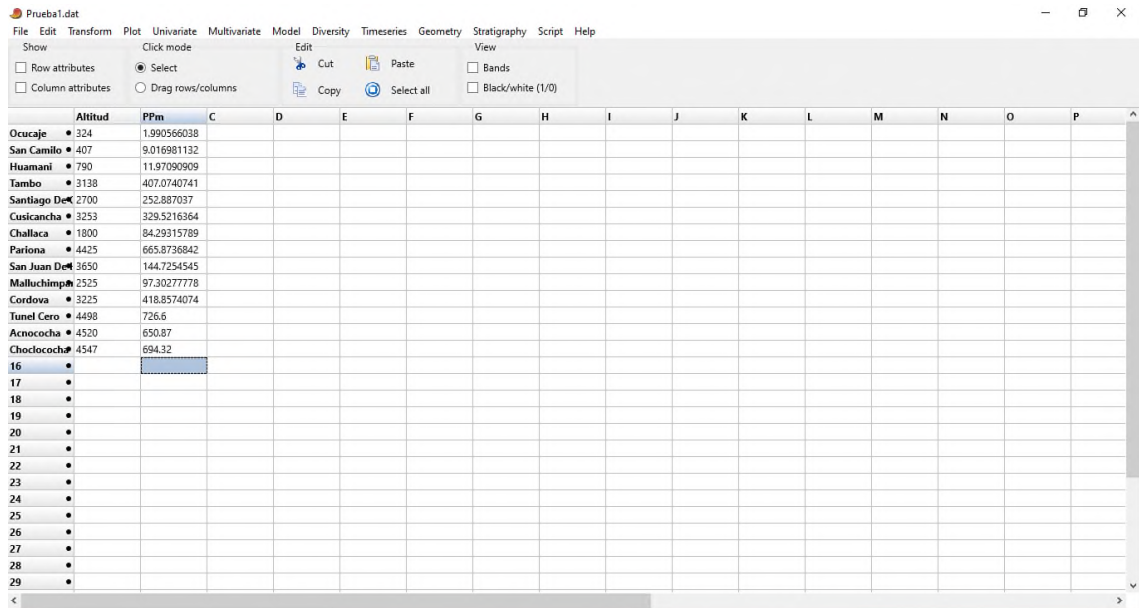


Figura 10. Formato de entrada en el software Past3

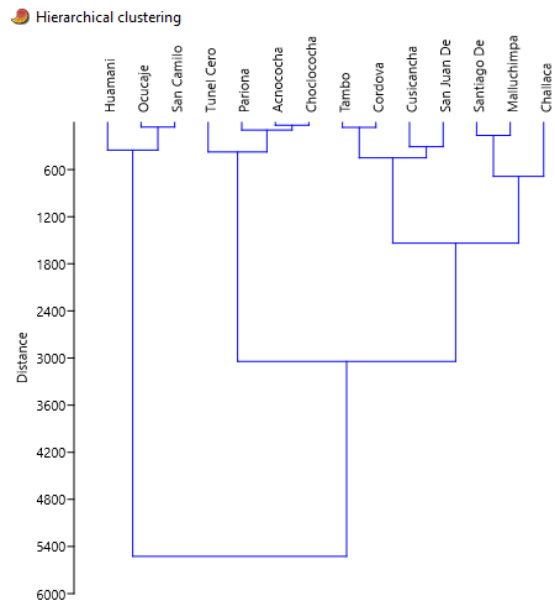


Figura 11. Agrupación jerárquica

b. Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos (MVR)

El MVR es un método de cálculo orientado a dos tareas definidas: La crítica de datos y la homogenización. La idea básica del MVR es elaborar una estación ficticia que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones. Para calcular la “estación vector”, el MVR emplea el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales y la precipitación media extendida [21].

El paquete computacional HYDRACCESS, ejecuta el MVR y proporciona la información en hojas de cálculo de Microsoft Excel, de la cual los parámetros que muestran un buen

comportamiento de una estación son la Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor alto indica desviaciones fuertes y la Correlación entre la estación y el vector, identifica si la zona es homogénea climáticamente, si los valores serán cercanos entre sí, y si un valor es mucho o más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene alta probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona [22].

Se empleó el MVR para homogenizar los datos pluviométricos para lo cual se agrupa las estaciones en base al Mapa Climático del Perú, bajo la hipótesis que para una misma zona climática existe un mismo régimen de precipitación según la figura 12, se identificaron 4 zonas climáticas:

- Zona 1 - E(d) B'1H3 : clima semi cálido, desértico, con deficiencia de lluvia en todas las estaciones, con humedad relativa calificada como húmedo. Conformada por las estaciones: Ocucaje, San Camilo y Huamani
- Zona 2- C(o,i,p) B'2 H3 : clima semi seco, templado, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda. Conformada por las estaciones: Malluchimpana y Santiago de Chocorvos. La estación Challaca será incluida en esta zona por encontrarse próximo a esta zona.
- Zona 3 -C (o, i, p) B'3 H3: clima semi seco, semi frio, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda. Conformada por las estaciones: Cusicancha, Tambo, San Juan de Huirpacancha y Córdova.
- Zona 4- B(i) D'H3: clima semi frígido, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda. Conformada por las estaciones: Choclococha, Accnocochoa, Túnel Cero y Pariona.

De la agrupación jerárquica (figura 11) y por zonas climáticas, se obtuvo una similar zonificación de las estaciones, guardando consistencia entre sí. Sin embargo, las estaciones Ocucaje, San Camilo y Huamani no se considerarán debido a que el valor de precipitación total multianual se encuentra por debajo del promedio de las demás estaciones (Ver figura 10).

En el paquete computacional HYDRACCESS, se ingresó los registros de las estaciones previamente completados para el periodo (1964-2018), acto seguido en la pestaña Lluvias en procesamiento multi estación se seleccionó las estaciones pertenecientes a una misma zona

climática para obtener los datos de lluvia anual en una hoja de Excel HA_Multiestaciones.xls dado que el MVR se basa en el cálculo de Índices Anuales de Lluvias. Luego en la pestaña utilitarios se ejecutó el MVR, ingresando el archivo HA_multiestaciones, año de inicio y final de trabajo y el método a emplear. Finalmente, se crea la hoja de Excel HA_Vector.xls donde se evaluó los parámetros más relevantes: La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D) y la Correlación entre la estación y el vector.

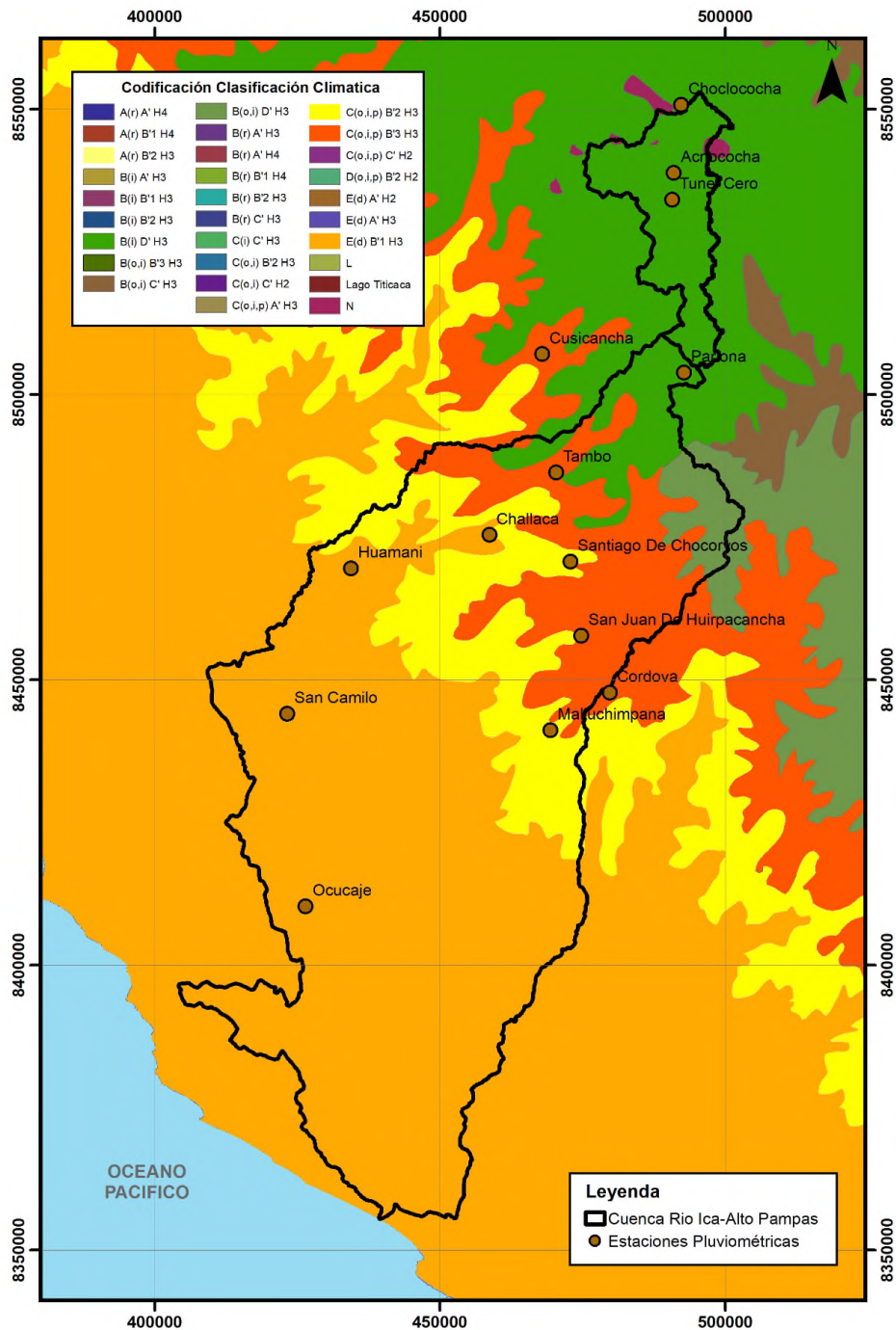


Figura 12. Mapa de clasificación climática en la Cuenca del río Ica-Alto Pampas elaborado para la presente tesis.

Cabe mencionar que cada zona climática identificada, presenta un “vector regional” que muestra la variabilidad pluviométrica y el comportamiento de todas las estaciones que forman parte de la zona climática, para el periodo comprendido entre 1964 y 2018.

En la figura 13, se graficó los índices anuales del vector regional y de las estaciones de la zona 2, en ella se aprecia los límites superior e inferior (las líneas rojas punteadas) y que la posición de los índices de las estaciones respecto al vector regional (línea roja continua) es similar. De la tabla 5, la desviación estándar de los desvíos es menor a 0.4 y la correlación de cada estación respecto al Vector es mayor a 0.8, correspondiendo a estaciones que se encuentran dentro de una zona Homogénea.

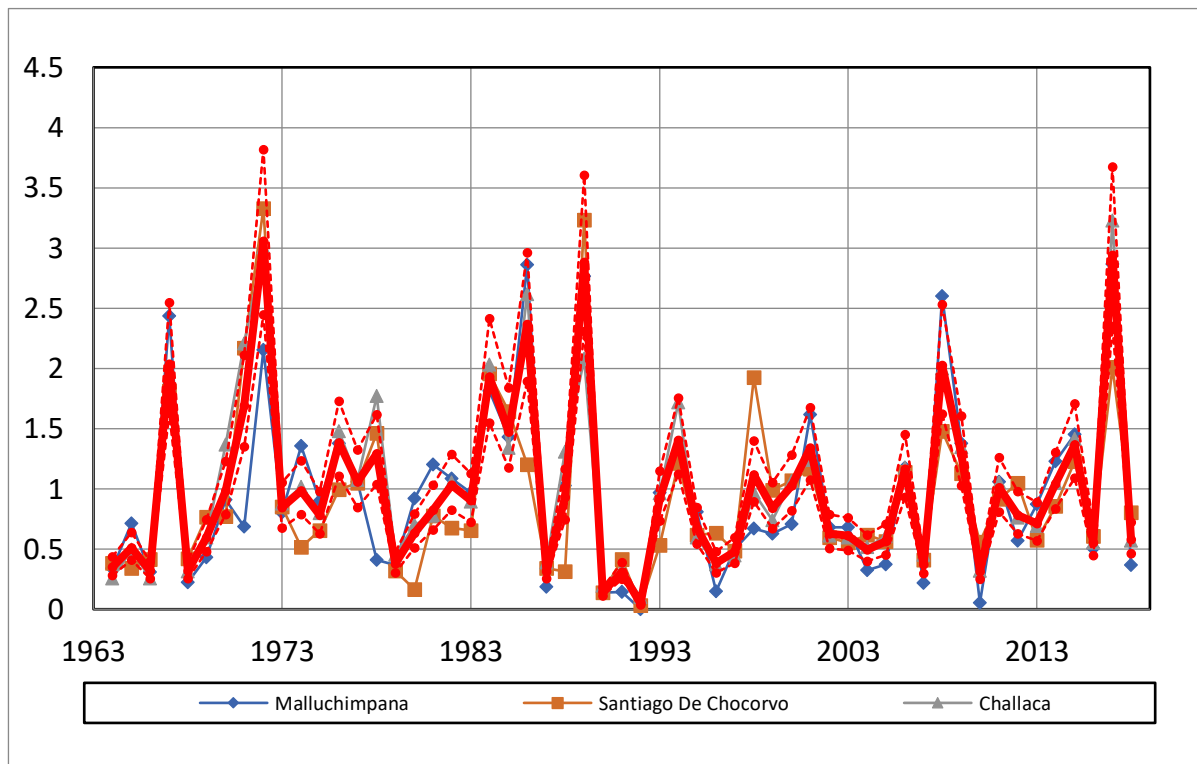


Figura 13. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 2 (Brunet Moret)

Tabla 5. Parámetros para determinar la homogeneidad - Zona 2

Estación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Malluchimpana	0.294	0.916
Santiago De Chocorvos	0.321	0.893
Challaca	0.184	0.966

En la figura 14, se graficó los índices anuales del vector regional y de las estaciones de la zona 3, en ella se aprecia los límites superior e inferior (las líneas rojas punteadas) y que la posición de los índices de las estaciones respecto al vector regional (línea roja continua) es similar. De la tabla 6, la desviación estándar de los desvíos es menor a la unidad lo que indica una buena calidad de la estación y la correlación de cada estación respecto al Vector son altas, correspondiendo a estaciones que se encuentran dentro de la zona Homogénea.

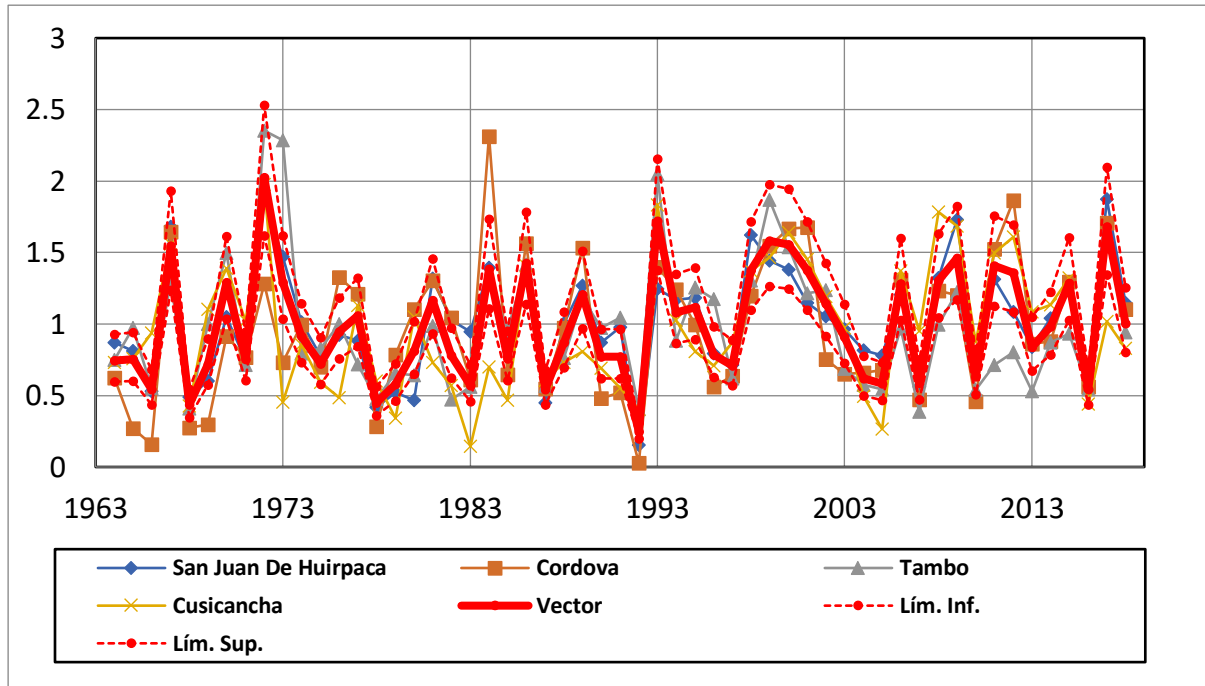


Figura 14. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 3 (Brunet Moret)

Tabla 6. Parámetros para determinar la homogeneidad – Zona 3

Estación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
San Juan De Huirpacancha	0.161	0.912
Córdova	0.277	0.824
Tambo	0.258	0.824
Cusicancha	0.273	0.792

En la figura 15, se graficó los índices anuales del vector regional y de las estaciones de la zona 4, en ella se aprecia que los valores de índices anuales de la estación Túnel Cerro sobrepasa el límite superior en el año 1993 y el inferior en el año 2016, lo cual podría deberse a un error en el registro de los datos, sin embargo, analizando la tabla 7, la desviación estándar de los desvíos es menor a 0.2 y la correlación de cada estación respecto al Vector es mayor a 0.78 en promedio.

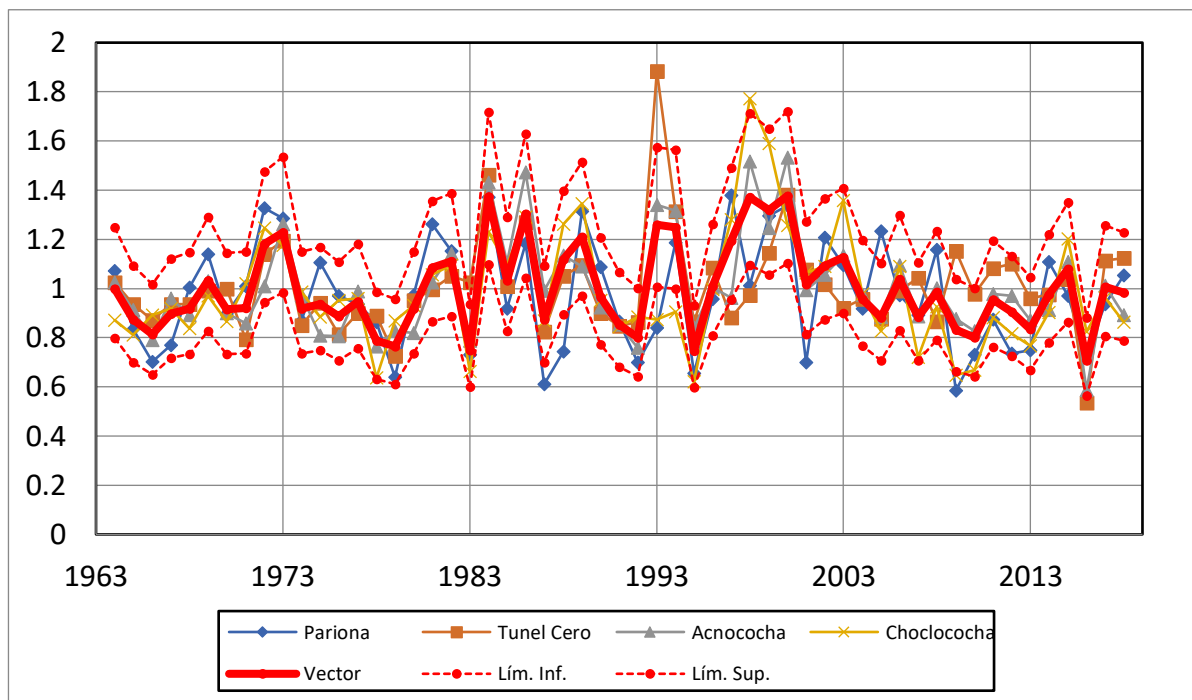


Figura 15. Índices anuales del Vector y de las Estaciones – Zona 4 (Brunet Moret)

Tabla 7. Parámetros para determinar la homogeneidad – Zona4

Estación	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Pariona	0.150	0.733
Túnel Cero	0.151	0.671
Accnococha	0.077	0.922
Choclococha	0.130	0.824

2.3.2.4 Análisis estadístico de saltos y tendencias

a. Análisis de Saltos

- Consistencia de la media: Consiste en verificar mediante la prueba “t”, si los valores medios de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o 5% de nivel de significancia.
- Consistencia de la desviación estándar: Consiste en verificar mediante la prueba “F”, si los valores de la desviación estándar de las submuestras son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o 5% de nivel de significancia.

Si los parámetros media y desviación estándar de las submuestras del periodo de tiempo, resultan estadísticamente iguales no se corrigen, caso contrario se corrigen los valores de las submuestras.

b. Análisis de Tendencias

Tendencia a la media: Consiste en calcular los parámetros de la regresión línea simple, evaluando el coeficiente de regresión B_m o el coeficiente de correlación R , para lo cual se calcula el valor estadístico del “ t ” calculado comparándolo con el valor crítico de “ t ” de la tabla de t de student.

Tendencia en la desviación estándar: Consiste en calcular los parámetros de la regresión a partir de las desviaciones estándar anuales y el tiempo t . Para la evaluación de T_s se calcula el valor estadístico del t comparándolo con el valor crítico de t de la tabla de t de student.

En la Tabla 8, se presenta el análisis y tratamiento estadístico completo de las 11 estaciones utilizadas en el estudio de la cuenca, incluido el análisis de saltos y tendencias.

Las estaciones Ocucaje, San Camilo y Huamani, se encuentran en la costa (324,407 y 790 m.s.n.m respectivamente) registran precipitaciones mensuales muy bajas, entre los meses de abril y noviembre muestran registros de 0,00 milímetros de lluvia, por lo que serán excluidas considerándose que la serie histórica es de similar comportamiento durante los siguientes años.

Tabla 8. Pruebas estadísticas para el análisis de consistencia

Muestra	N	Media	Desviación	Análisis de Saltos				Análisis de Tendencias				Resultado
				Prueba "T"		Prueba "F"		Media		Desv.Est.		
				Tcal	Ttabl	Fcal	Ftabl	Tcal	Ttabl	Fcal	Ftabl	
Estación Tambo												
M1	348	35	63	0.37	1.96	0.97	1.22	0.74	1.96	0.89	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	312	37	63									
Estación Cordova												
M1	348	30	64	1.49	1.96	0.87	1.22	1.36	1.96	1.43	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	312	37	69									
Estación Cusicancha												
M1	288	26.77	48.81	1.83	1.96	0.90	1.22	1.41	1.96	0.55	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	372	34.00	51.47									
Estación San Juan de Huirpacancha												
M1	288	26.77	48.81	1.83	1.96	0.90	1.22	1.41	1.96	0.55	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	372	34.00	51.47									
Estación Chocorvos												
M1	300	21.18	54.91	0.23	1.96	1.43	1.22	0.35	1.96	0.78	2.00	La serie historica presenta un posible salto en el año 1989, sin embargo este no se procedio a corregir, ya que la estacion vecina tambien registran valores altos el mismo año. La serie no presenta tendencia.
M2	360	20.26	45.91									
Estación Malluchimpana												
M1	288	9.26	22.48	0.73	1.96	1.07	1.22	0.09	1.96	0.23	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	372	7.99	21.75									
Estación Challaca												
M1	276	8.38	20.91	1.32	1.96	1.84	1.22	0.44	1.96	0.70	2	La serie historica presenta un posible salto en el año 1989, sin embargo este no se procedio a corregir, ya que las demas estaciones vecinas tambien registran valores altos el mismo año. La serie no presenta tendencia.
M2	384	6.51	15.40									
Estación Pariona												
M1	348	58.96	65.68	0.04	1.96	0.96	1.22	0.60	1.96	0.31	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	312	58.73	66.86									
Estación Accnococho												
M1	360	54.93261111	53.34880619	0.38	1.96	0.77	1.22	0.04	1.96	0.94	2	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	300	56.604	60.84672245									
Estación Choclococha												
M1	372	84.01543011	79.21326703	0.41	1.96	0.89	1.22	0.19	1.96	0.10	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	288	86.65038194	83.98400981									
Estación Tunel Cero												
M1	348	69.42655172	62.88150969	1.02	1.96	0.74	1.22	0.31	1.96	1.86	2.00	La serie historica no presenta saltos ni tendencias
M2	312	74.83980769	73.3006805									

2.3.3 Análisis de información hidrométrica

Para el análisis de consistencia de la información hidrométrica se empleó la serie de caudales naturalizados (1964-2005) de la estación hidrométrica La Achirana, es decir los caudales propios

del río Ica sin considerar los aportes del sistema hidráulico Choclococha. Se realizó el diagrama de cajas, el análisis gráfico y estadístico.

2.3.3.1 Diagrama de cajas

El diagrama de cajas de los caudales medios mensuales observados en la estación hidrométrica La Achirana para el periodo 1964-2005, presentan valores atípicos(outliers) fuera de los límites de confianza, sin embargo, estos datos atípicos corresponden a los periodos húmedos (enero hasta abril). La serie de tiempo presenta sesgo a la derecha.

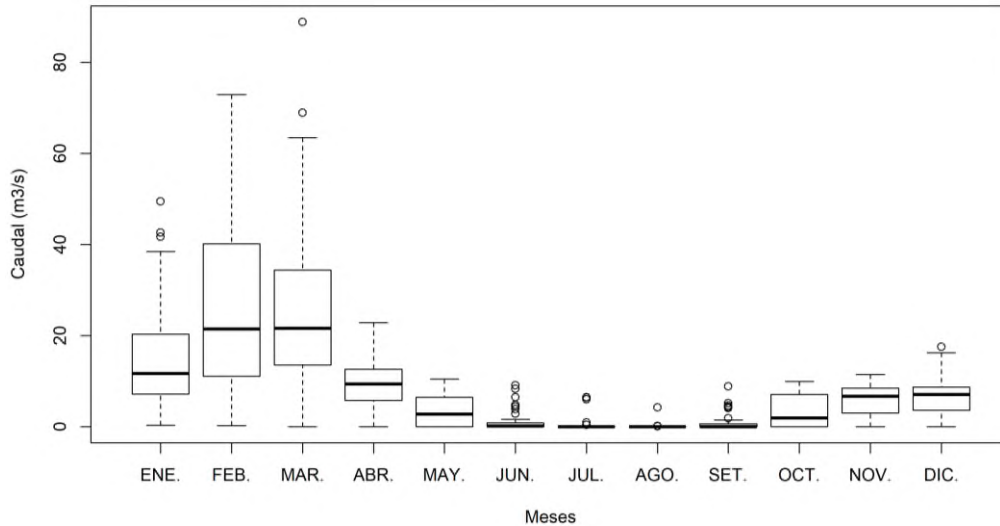


Figura 16. Diagrama de Cajas Estación La Achirana (Caudal)

2.3.3.2 Análisis Gráfico

Se realizó el análisis gráfico de la información hidrométrica que registra la estación de aforos La Achirana en el periodo 1964-2005. El análisis gráfico ayuda a ver la consistencia en la información hidrológica en forma gráfica, es decir puede reflejar un valor alto o bajo, saltos y/o tendencias.

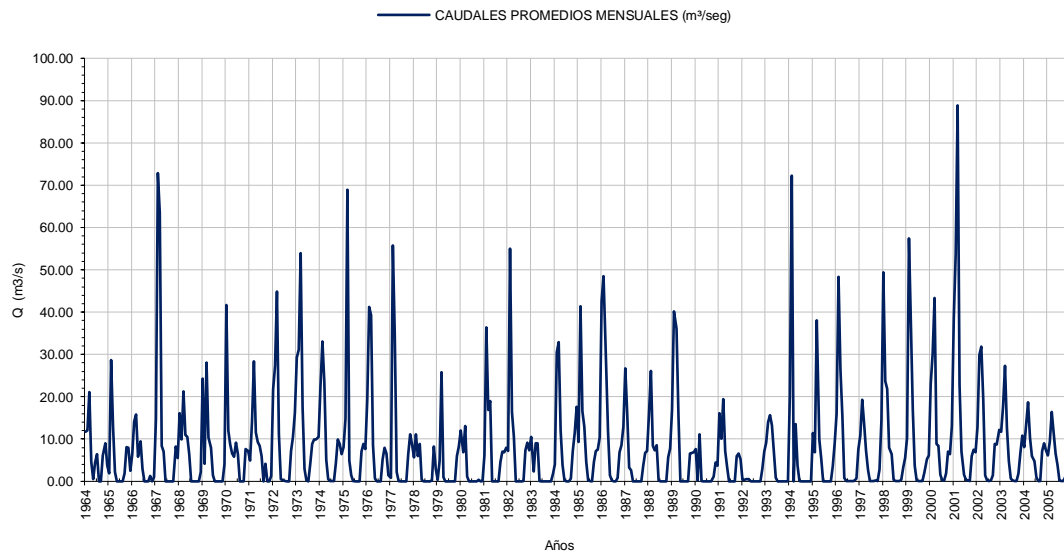


Figura 17. Descargas medias mensuales (m³/s) - Registro histórico 1964 -2005

De la figura se muestra un posible salto o error sistemático en el mes de marzo del año 2001, sin embargo, no existe coherencia entre el caudal observado y la precipitación de aquel año por lo cual podría ser un error en el registro.

2.3.3.3 Análisis estadístico de saltos y tendencias

Se analizó estadísticamente los periodos 1964-1985 como primer periodo y de 1986-2005 como segundo periodo, del cual se concluye que la serie histórica está libre de saltos y tendencias, sin considerar el dato del 2001.

Tabla 9. Pruebas estadísticas para el análisis de consistencia

Muestra	N	Media	Desviación	Análisis de Saltos				Análisis de Tendencias			
				Prueba "T"		Prueba "F"		Media		Desv.Est.	
				Tcal	Ttabl	Fcal	Ftabl	Tcal	Ttabl	Fcal	Ftabl
M1	264	5.69	12.17	-	1.96	0.88	1.23	1.28	1.96	0.59	2.02
M2	240	6.97	12.94	1.14							

2.3.4 Análisis de información climática futura

2.3.4.1 Preparación de la información climática

La información recopilada de los distintos modelos climáticos fueron regrillados a una grilla regular común de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (grilla de PISCO v2.1) mediante el método de interpolación bilineal. Este procedimiento se aplicó a todas las variables climáticas descargadas (Precipitación, Temperatura, Humedad relativa y Velocidad del viento) para facilitar el procesamiento de la información. Posteriormente, se extrajo la información de las grillas cercanas a los puntos de estudio, es decir en los centroides que representan a cada subcuenca. En la Figura 18 se muestra el dominio sur América en grilla irregular a una resolución de 0.22° y en la Figura 19 se muestra el mapa de Perú regrillado a una grilla regular común de 0.1° .

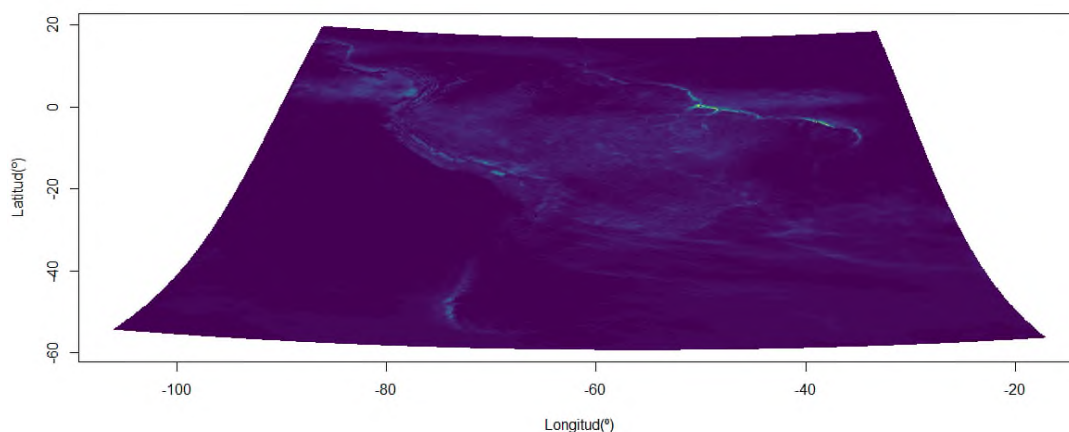


Figura 18. Dominio Sur América en grilla irregular a una resolución de $0.22^\circ \times 0.22^\circ$ del modelo climático regional forzado con el modelo HadGem2-ES-REMO_Historico

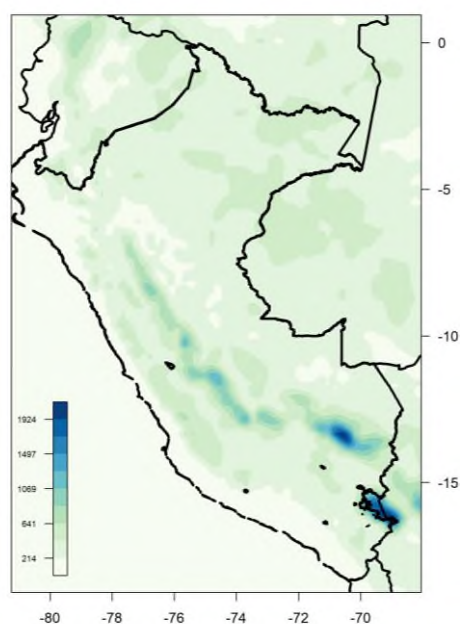


Figura 19. Perú interpolado a una grilla regular común de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (grilla de PISCO v2.1) del modelo HadGem2-ES-REMO_Historico

2.3.4.2 Validación de información de los modelos climáticos

La simulación de los modelos climáticos tanto regionales como globales están sujetas a fuentes de errores del tipo sistemático (bias) así como aleatorios, ocasionando desviaciones considerables con respecto a los datos observados. En ese sentido, los datos de los modelos climáticos pasaron por un proceso de validación contrastando con información observada, con el objetivo de detectar los posibles errores a nivel temporal y espacial, y que serían de utilidad en la posterior corrección y análisis.

La validación se realizó mediante métricas estadísticas que miden distintos atributos de los errores, usando la información observada a escala mensual y la información de los modelos para el periodo histórico 1981-2000.

Para evaluar el error sistemático se utilizó el Bias relativo el cual está basado en la diferencia de medias de los datos del modelo menos los datos observados, tal y como se muestra fórmula 1.

$$BIAS = \bar{X} - \bar{O} \dots (1)$$

De donde:

\bar{X} = medias de los datos del modelo

\bar{O} = medias de los datos observados

Mediante esta métrica se puede identificar las zonas y meses en los cuales los modelos sobrestiman o subestiman. Mientras más cercano el bias se encuentre a cero, menor será el error sistemático. Adicionalmente, se estimó el error cuadrático medio (RMSE), el cual es una medida del error absoluto (error sistemático más errores aleatorio) por parte del modelo. Los resultados de dicha métrica siempre son positivos, y mientras más cercanos estén los valores a cero menor error presentaría el modelo, ver fórmula 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-o)^2}{n}} \dots (2)$$

El error sistemático calculado de las series de precipitación del modelo con las observaciones se muestra en la figura 20 para el periodo de 1981-2000. Se evaluó la sobreestimación y subestimación en la climatología de P y T para el periodo histórico (1981-2000), el bias se visualizó en gráficos de cuadrícula en función del método de corrección. Los tonos más intensos indican mayor distanciamiento del comportamiento de las observaciones.

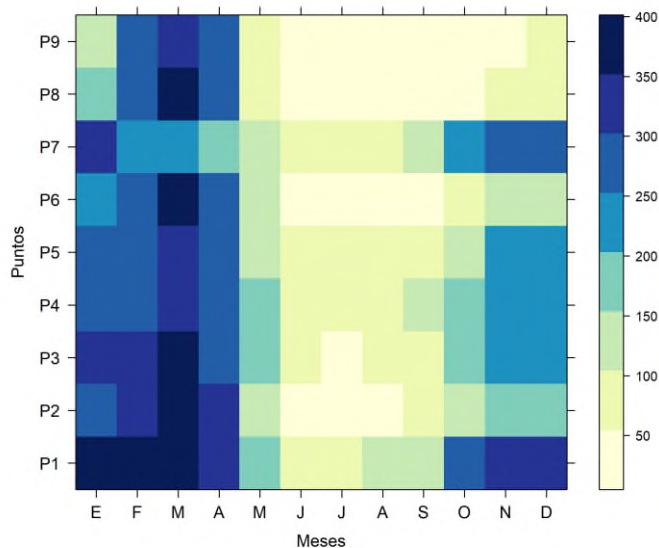


Figura 20. Distribución del bias de la precipitación estimada relativo a sus observaciones en el periodo 1981-2000 (HadGem2-ES-REMO).

El bias de precipitación mostrada en la figura 20, presenta bias positivo en el primer trimestre del año debido a la sobreestimación del modelo respecto a las observaciones principalmente en el mes de marzo localizada en la parte alta de la cuenca. Mientras que en la parte baja de la cuenca se presentan bias secos a partir del mes de junio.

En la figura 21, se observa el ciclo anual de los valores de precipitación observada y estimada por el modelo HadGem2-ES-REMO-Historico para un punto ubicado en la parte alta de la cuenca. En general, presenta mayor alejamiento en la temporada lluviosa, con magnitud por encima de los 200 mm.

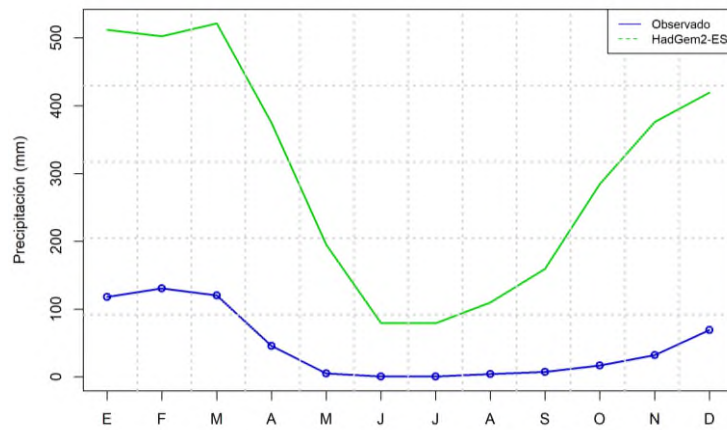


Figura 21. Comportamiento del ciclo anual medio de precipitación del modelo HadGem2-ES-REMO_Historico

2.3.4.3 Corrección de bias de información de los modelos climáticos

Los errores sistemáticos (o bias) son los errores que están constantemente en los modelos debido a la baja resolución espacial o a una inadecuada representación de la topografía. Para este tipo de errores, se han desarrollado métodos de corrección con el fin de reducirlos y hacer frente a los sesgos no estacionarios [23].

En la presente tesis para corregir el error sistemático (bias) de las variables de precipitación y temperatura, se utilizó el método de corrección Scaling, el cual emplea un factor de corrección multiplicativo a la serie de precipitación obtenida del modelo, de esta manera se obtiene la precipitación del modelo ajustado estadísticamente [24]. La fórmula es la siguiente:

$$\widehat{PP}_{mod} = PP_{mod} \times \frac{\overline{PP}_{obs}}{\overline{PP}_{mod}} \dots (3)$$

Donde:

\widehat{PP}_{mod} = Precipitación del modelo ajustado estadísticamente

PP_{mod} = Precipitación del modelo sin ajuste.

\overline{PP}_{obs} = Promedio de la precipitación observada sobre el periodo de calibración.

\overline{PP}_{mod} = Promedio de la precipitación del modelo sobre el periodo de calibración.

La corrección de temperatura se basó en un factor de corrección del tipo aditivo estimado mediante los promedios de los datos simulados y observados (fórmula 4):

$$\hat{T}_{mod} = T_{mod} - (\bar{T}_{mod} - \bar{T}_{obs}) \dots (4)$$

La corrección de bias fue aplicada independientemente a cada variable y a cada grilla del modelo utilizado sobre la cuenca de estudio. Como información se utilizó datos observados, sobre el área de estudio. Cabe destacar la necesidad de este proceso con el fin de asegurar la coherencia y consistencia de la información de entrada para la posterior simulación hidrológica.

Para obtener el modelo ajustado estadísticamente se realizó la calibración de los factores de corrección mostrados en las fórmulas 3 y 4 se realizó en el periodo histórico que comprende los años 1981 al 2000. Posteriormente, se aplicó los factores correctivos a las simulaciones futuras de precipitación y temperatura en el periodo de 2021-2060.

2.3.4.4 Aplicación de la corrección a los escenarios futuros

Las salidas de temperatura y precipitación estimadas a escala mensual para los períodos 2021-2040 y 2041-2060 en los escenarios futuros (RCP 2.6 y RCP 8.5) fueron ajustadas con el factor aditivo y multiplicativo que fue aplicado en el periodo histórico (1981-2000).

2.3.5 Modelación hidrológica con WEAP

2.3.5.1 Delimitación de hidrográfica de subcuencas

El modelo hidrológico WEAP es un modelo semidistribuido, el cual considera las variaciones espaciales como los tipos de suelos y sus características que varían en toda la extensión del área de estudio. Por lo cual requiere la entrada de datos por subcuencas (producto de la subdivisión de la cuenca en estudio).

La cuenca río Ica-Alto Pampas se dividió en 25 subcuencas mediante la extensión Archydro del software ArcGis a partir de un modelo de elevación digital (DEM) de la cuenca. Se realizaron los siguientes pasos:

a. Modelo de elevación digital (DEM)

Primero, a partir de las curvas de nivel se crea un TIN con la herramienta 3D analyst Tools del Arctoolbox (ArcGis) para luego convertir el TIN a un Raster, creándose el archivo DEM.

b. Remoción de Depresiones

Las depresiones de un DEM se eliminan con un auto procesamiento, utilizando la herramienta "Fill Sinks" o "Llenado de huecos" en el grid o celdas, teniendo en cuenta un umbral promedio para pixeles vecinos. Dicho procedimiento elimina depresiones aisladas por celdas de mayor

elevación, modificando el valor de la elevación, es decir rellenando las depresiones para eliminar este error. Al finalizar se creó un archivo tipo raster “fill”

c. Dirección de flujo

Mediante la herramienta flow direction, se calculó la dirección de flujo de cada grilla del DEM. Los valores de cada grilla indica la dirección de descenso máximo en cada grilla. Se creó un raster “Fdr”.

d. Flujo acumulado

En función del raster “Fdr” se calculó la grilla de acumulación de flujo creándose un archivo raster “Fac”.

e. Definición de la red de drenaje

Se calculó una grilla de corriente que contiene un valor de “1” para aquellas celdas en la grilla de acumulación de flujo que contengan un valor mayor que un umbral especificado. Es decir, se creó un archivo raster, en el cual los pixeles tendrán valor 1 si pertenecen a la red de drenaje.

f. Segmentación de la red de drenaje

Se creó una grilla de segmentos de la red de drenaje, los que tienen identificación única.

g. Delineamiento de microcuencas

Se creó una grilla donde cada celda posee un valor (código de grilla), el cual indica a que microcuenca pertenece.

h. Procesamiento del polígono de microcuencas

Esta función convierte la grilla de microcuencas en un shapefile de polígonos obteniéndose 25 microcuencas.

i. Procesamiento de la red de drenaje

Se convirtió el raster de la red de drenaje creado con la función Stream definition en un shapefile de líneas.

j. Procesamiento de las áreas de influencia de las cuencas (Adjoint catchment processing)

Se creó cuencas de forma agregada a partir de la grilla de microcuencas delimitadas con la función Catchment grid delineation

k. Punto de delineación (Point delineation)

La herramienta point delineation permitió crear puntos de concentración para cada microcuenca dentro de la red de drenaje. Dichos puntos se asocian a un área de drenaje determinado.

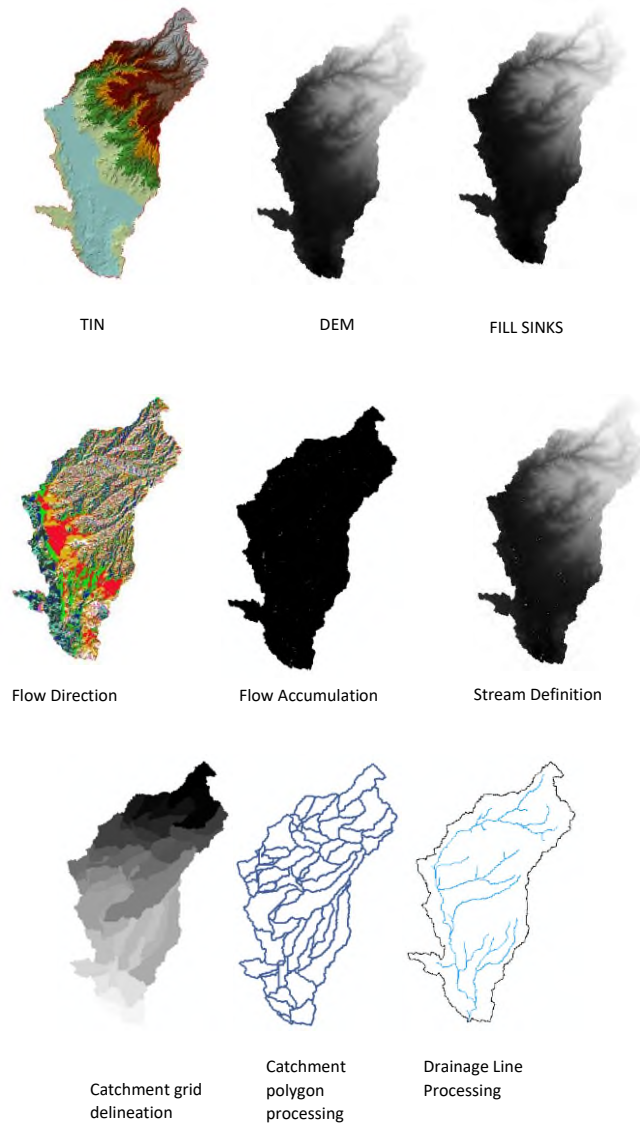


Figura 22. Delimitación de hidrográfica de subcuencas

2.3.5.2 Mapa de cobertura vegetal

La clasificación de la cobertura vegetal actual en la cuenca de estudio está basada en criterios geográficos, climáticos, fisonómicos y fisiográficos, así mismo, no se realizó una reagrupación manteniéndose la clasificación original.

2.3.5.3 Catchments

Los catchments se obtienen de la intersección del mapa de subcuencas y de acuerdo a su tipo de cobertura vegetal. Una vez obtenidos los catchments, se calcula sus áreas y su distribución de cobertura vegetal para la definición del esquema del modelo.

2.3.5.4 Modelo Hidrológico “WEAP”- Método Humedad del Suelo

Para la modelación de la cuenca del río Ica-Alto Pampas se escogió el método de humedad de suelo, el cual divide el suelo en dos capas (capa superior e inferior). En la capa superior recibe los aportes de precipitación, derretimiento de hielo e irrigación y considera como perdidas la evapotranspiración y el flujo de caudal. Así mismo, en la ecuación del modelo hidrológico cada término de la ecuación corresponde a un elemento del balance hidrológico que es afectado de forma diferente por los parámetros.

Para el método de la humedad del suelo, la calibración y validación está determinada por la siguiente ecuación del balance hídrico en la capa superior [2]:

$$\underbrace{SW_j}_{1} \frac{dZ_{1,j}}{dt} = \underbrace{P_e(t)}_{2} - \underbrace{PET(t) K_{c,j}(t)}_{3} \left(\frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - \underbrace{P_e(t) Z_{1,j} \frac{LAI_j}{2}}_{4} - \underbrace{f_j k_j Z_{1,j}^2}_{5} - \underbrace{(1 - f_j) k_j Z_{1,j}^2}_{6}$$

Donde:

1er término: Cambio en humedad del suelo

2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)

3er término: Evapotranspiración

4to factor: Escorrentía superficial

5to término: Flujo intermedio

6to factor: Percolación

La capa inferior está compuesta por tres términos:

$$\underbrace{Dw}_{1} \frac{dZ_{2,j}}{DT} = \underbrace{(1 - f_j) k_j Z_{1,j}^2}_{2} - \underbrace{k_2 Z_{2,j}^2}_{3}$$

Donde:

1er término: Flujo base

2do término: Percolación

Del balance de agua en los baldes (superior e inferior) entre las entradas y salidas, se mide la eficiencia del modelo mediante pruebas de bondad y ajuste.

2.3.5.5 Definición del esquema del modelo

La modelación de la cuenca del río Ica-Alto Pampas mediante el método de humedad de suelo se realizó a nivel mensual para el periodo de registro (1964-2005). Se definió 9 catchments y sus áreas que representan.

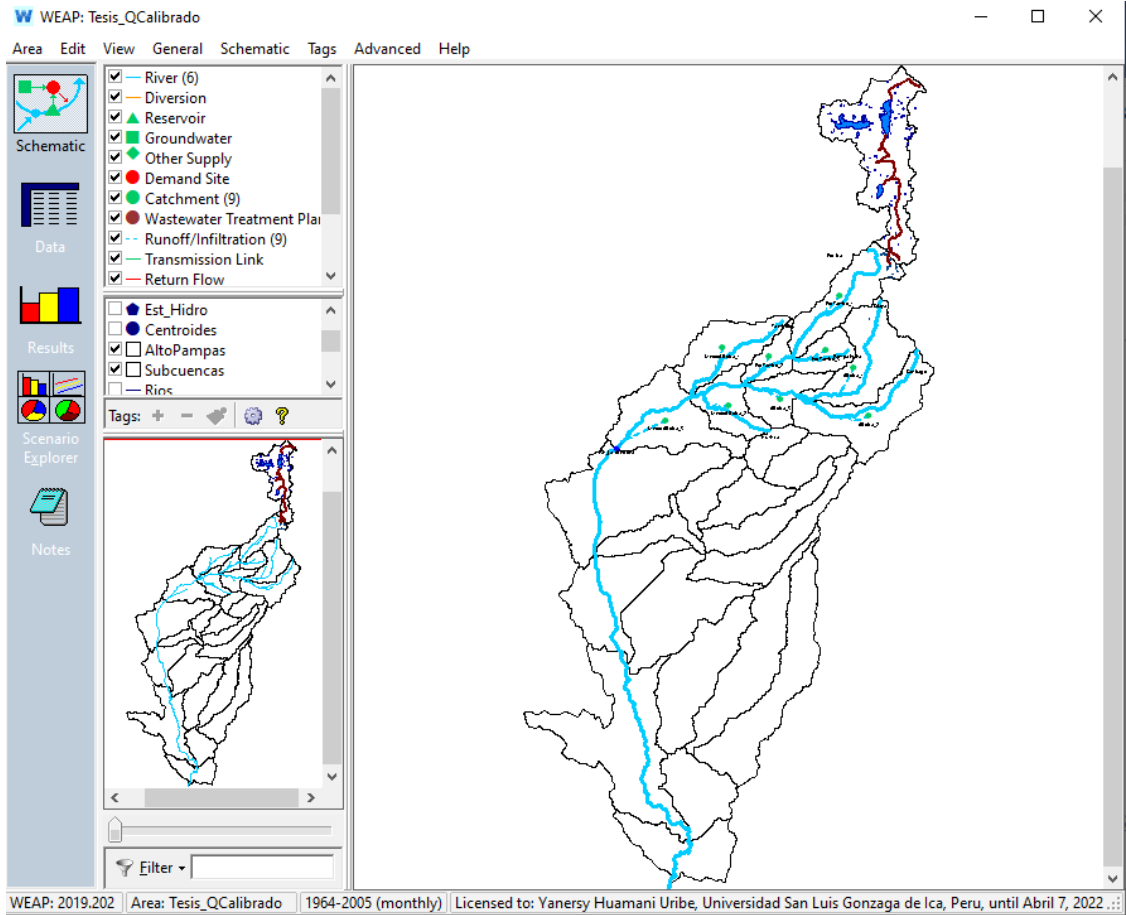


Figura 23. Esquema del modelo

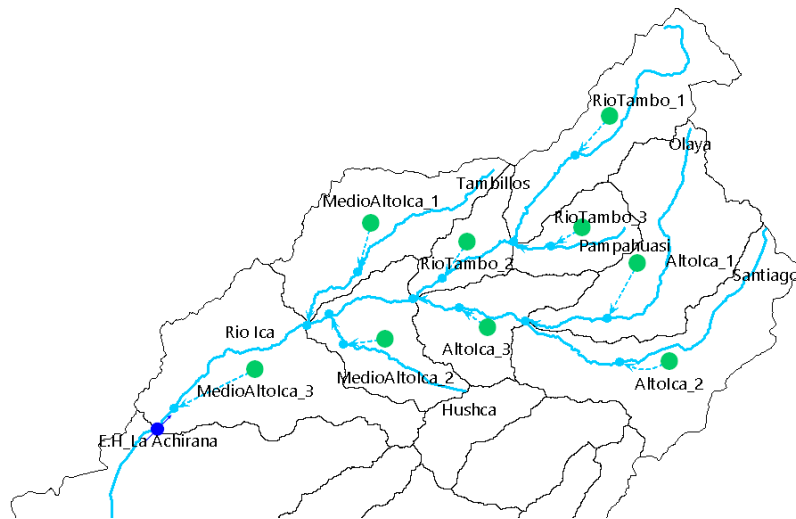


Figura 24. Subcuencas del esquema del modelo

La cobertura vegetal presente en la cuenca de estudio se describe a continuación:

Tabla 10. Agrupación de cobertura vegetal de la cuenca en estudio

Símbolo	Cobertura Vegetal	Área_Km2	Porcentaje %
Agri	Agricultura costera y andina	67.49	3.18
Br-al	Bosque relicto altoandino	7.59	0.36
Bsr	Bosque seco ribereño	8.57	0.40
Bo	Bofedal	0.44	0.02
Car	Cardonal	168.08	7.93
Dc	Desierto costero	143.62	6.78
Ma	Matorral arbustivo	897.87	42.37
Pj	Pajonal andino	824.18	38.89
U	Area urbana	0.48	0.02
L/Co	Lagunas, lagos y cochas	0.86	0.04
TOTAL		2119.16	100.00

2.3.5.6 Ingreso de datos para la simulación

Para elaborar el esquema base del modelo de simulación hidrológica WEAP, se inició definiendo la superficie de la cuenca y subcuencas, y la línea de drenaje. También se definió el periodo de registro (1964-2005) para el modelo del Río Ica. Luego se representa las unidades hidrológicas (subcuencas) mediante catchments, en cada uno se agrega información climatológica y de cobertura vegetal. La última sujeta a los parámetros del modelo vinculados a supuestos claves con el uso del editor de ecuaciones.

Se representó el punto de aforo con un streamflow gauge, punto que dispone de información hidrométrica para la calibración del modelo, vinculando la serie de caudales observados o medidos con los simulados mediante este punto. El punto de aforo en el modelo realizado es la estación La Achirana ubicada en el río Ica. Cada catchment fue dividido de acuerdo a su tipo de cobertura, posteriormente se calculó el porcentaje que representan dentro de cada catchment.

Tabla 11. Distribución de las coberturas la cuenca en estudio

SUBCUENCA	Cobertura Vegetal	Area_Km2	Porcentaje
Rio Tambo_1	Agricultura costera y andina	273.84	2.33
	Área urbana		0.03
	Bosque relicto altoandino		1.37
	Lagunas, lagos y cochas		0.31
	Matorral arbustivo		8.79
	Pajonal andino		87.18
Rio Tambo_2	Agricultura costera y andina	108.60	5.11
	Área urbana		0.04
	Bosque relicto altoandino		0.13

	Matorral arbustivo		22.07
	Pajonal andino		72.64
Rio Tambo_3	Agricultura costera y andina		8.85
	Área urbana	93.90	0.06
	Cardonal		0.17
	Matorral arbustivo		79.92
	Pajonal andino		11.00
Alto Ica_1	Agricultura costera y andina		0.90
	Área urbana	332.64	0.02
	Bosque relicto altoandino		1.11
	Lagunas, lagos y cochas		0.00
	Matorral arbustivo		27.43
	Pajonal andino		70.53
Alto Ica_2	Agricultura costera y andina		3.37
	Área urbana	348.65	0.01
	Bofedal		0.12
	Matorral arbustivo		36.15
	Pajonal andino		60.35
Alto Ica_3	Agricultura costera y andina		8.01
	Área urbana	161.96	0.00
	Cardonal		0.54
	Matorral arbustivo		82.07
	Pajonal andino		9.38
Medio Alto Ica_1	Agricultura costera y andina		0.86
	Área urbana	254.36	0.02
	Cardonal		6.74
	Desierto costero		1.04
	Matorral arbustivo		77.19
	Pajonal andino		14.16
Medio Alto Ica_2	Agricultura costera y andina		2.96
	Cardonal	176.38	15.30
	Desierto costero		2.14
	Matorral arbustivo		79.59
Medio Alto Ica_3	Agricultura costera y andina		3.29
	Área urbana	368.82	0.04
	Bosque seco ribereño		2.32
	Cardonal		33.33
	Desierto costero		37.20
	Matorral arbustivo		23.82

2.3.5.7 Calibración y validación

El proceso de calibración del modelo se realizó de manera iterativa y manual, realizando las modificaciones necesarias a los parámetros del método de humedad de suelo para obtener una correcta simulación de los caudales de las subcuencas aguas arriba.

La calibración se realizó en base a la comparación de los caudales observados en la estación hidrométrica La Achirana y los caudales simulados por el modelo para el período (1964-1984), mediante el uso de indicadores estadísticos: Índice de Nash, Bias y el RSR.

El proceso de validación del modelo, consistió en aplicar los parámetros obtenidos en la calibración del modelo para un período distinto (1985 – 2005) con la finalidad de evaluar el desempeño del modelo, es decir si su capacidad predictiva muestra errores dentro de los límites aceptables.

Los parámetros del método de humedad de suelo obtenidos en el proceso de calibración permitieron obtener una correcta simulación de los caudales de las subcuencas aguas arriba.

Tabla 12. Parámetros de la calibración

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Kc (coeficiente de cultivo)	-	0 – 1.5
Capacidad de agua en las zonas de raíces	mm	0 - 1000
Conductividad en zonas de raíces	mm/mes	0 - 45
Dirección del flujo	%horizontal	0 - 1
Z1 inicial	%	35
Z2 inicial	%	10
Capacidad de agua en zona profunda	mm	0 - 6000
Factor de resistencia a la escorrentía	-	0 - 5
Conductividad en la zona profunda	mm/mes	0 - 30

Fuente: Elaboración Propia

De los indicadores de eficiencia obtenidos: Índice de Nash, Bias y el RSR, en base a la comparación de los caudales observados y los caudales simulados en el modelo, el rendimiento del modelo estadísticamente es “Bueno”.

Tabla 13. Indicadores de eficiencia del modelo WEAP

Índice de eficiencia	Estación hidrométrica La Achirana		Rendimiento
	Calibración	Validación	
NASH	0.73	0.70	Bueno
BIAS	+4%	-6%	Muy Bueno
RSR	0.52	0.55	Bueno

En la figura 25, se muestra los caudales observados y simulados por el modelo WEAP del periodo (1964-2005) con una simulación aceptable.

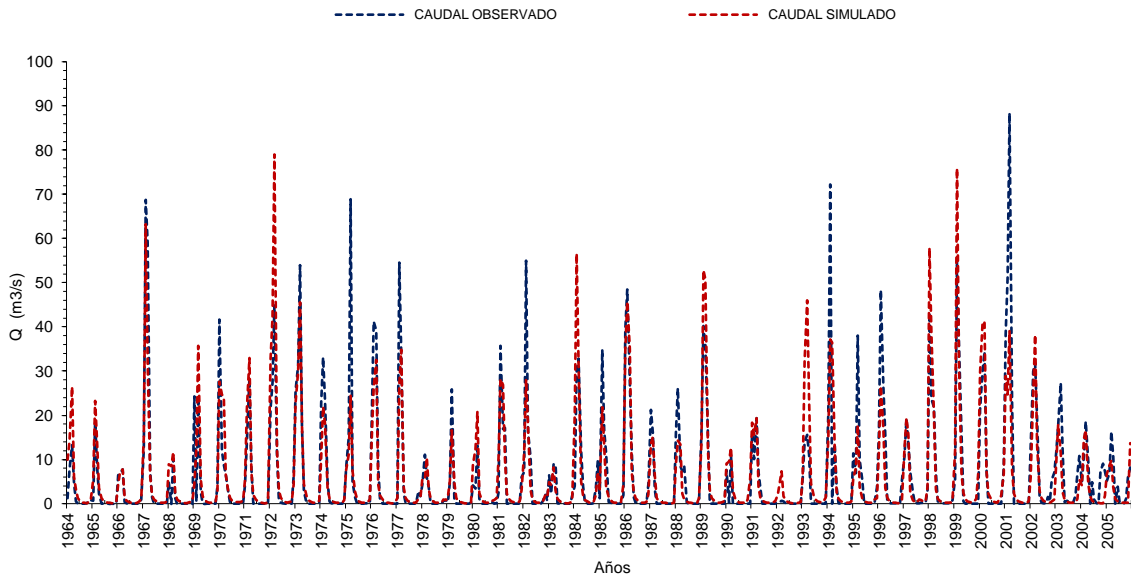


Figura 25. Caudales observados y simulados para el período de calibración y validación

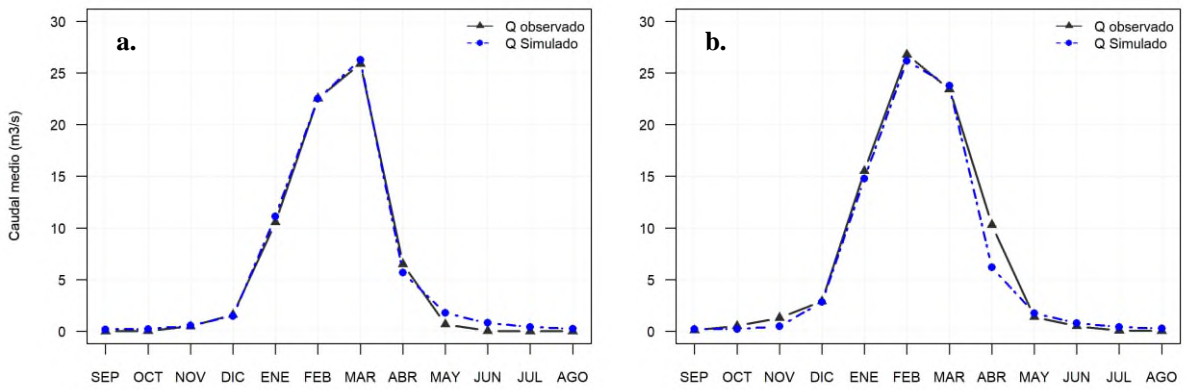


Figura 26. Caudal (Q) observado y simulado: a. Calibración y b. Validación

III. RESULTADOS

En la presente sección se evaluó las variaciones de la escorrentía asociada a los escenarios de precipitación y temperatura generados a partir de los modelos globales (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) y los modelos regionalizados (HadGem2-ES y MPI-ESM-LR). Para ello se definieron dos escenarios de emisión: un escenario de bajas emisiones (RCP 2.6) y otro de altas emisiones (RCP 8.5). De esta manera, se obtuvieron un total de ocho escenarios hidrológicos proyectados para la estación hidrométrica La Achirana en el periodo 2021 -2060.

Tabla 14. Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Ica

MCG	Modelo regional	Dominio	Resolución	Escenario	Escenarios Climáticos Proyectados
MPI-ESM-MR			1.8°	RCP 2.6	MPI-ESM-MR-RCP 2.6
				RCP 8.5	MPI-ESM-MR-RCP 8.5
HadGem2-AO			1.8°	RCP 2.6	HadGem2-AO-RCP 2.6
				RCP 8.5	HadGem2-AO-RCP 8.5
MPI-ESM-LR	REMO	South America	0.22°	RCP 2.6	MPI-ESM-LR-REMO-RCP 2.6
				RCP 8.5	MPI-ESM-LR-REMO-RCP 8.5
HadGem2-ES	REMO	South America	0.22°	RCP 2.6	HadGem2-ES-REMO-RCP 2.6
				RCP 8.5	HadGem2-ES-REMO-RCP 8.5

3.1 Cambios futuros en la precipitación y temperatura

Se presenta los resultados de los cambios futuros en la precipitación y temperatura, en base a los modelos climáticos y escenarios de emisión considerados. A continuación, se describe los resultados del modelo global HadGem2-AO por su mayor dispersión en los escenarios futuros RCP 2.6 y RCP 8.5; y respecto a los demás modelos considerados estos presentan una menor dispersión y una representación similar del ciclo anual con sobrestimación en el periodo lluvioso, lo cual se puede visualizar en las Figuras del 38 al 43 (ANEXO 1), 47 al 58 y en las Tablas del 30 al 41 (ANEXO 2).

a. PRECIPITACIÓN

En la figura 27 se presenta el ciclo anual correspondiente a los datos observados y del modelo HadGEM2-AO. Se aprecia que el régimen de precipitación del modelo en el periodo histórico se aproxima notablemente al del observado, presentándose en ambos los valores más alto entre los

meses de diciembre a abril. Los escenarios futuros indican un incremento durante los meses de octubre a diciembre y ligeras disminuciones entre los meses de enero a marzo.

Adicionalmente, en la tabla 15, se observa para el escenario RCP 2.6 en el periodo 2021-2040 un incremento en la precipitación de 9.87% a nivel anual; y en el mes de setiembre, un incremento significativo de 66.13%. Para el mismo escenario, en el periodo 2041-2060 existe una disminución de la precipitación anual de -9.58%, debido principalmente a reducciones en el rango de -2.62 % y -23.7% entre los meses enero a junio, como se observa en la figura 28(a).

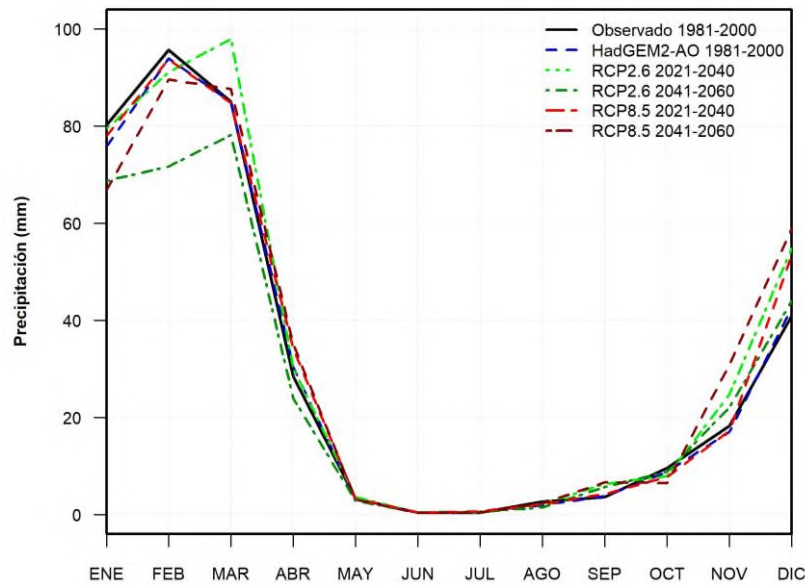


Figura 27. Análisis comparativo entre la precipitación del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-AO

Tabla 15. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	75.84	93.89	84.88	30.42	3.27	0.43	0.48	2.01	3.81	8.82	17.12	42.51	363.47
2021-2040 (mm)	79.43	91.07	97.90	30.24	3.62	0.47	0.42	2.30	6.33	7.98	24.77	54.82	399.36
2041-2060 (mm)	68.74	71.64	78.14	23.97	2.92	0.42	0.67	1.48	5.76	8.84	22.06	43.99	328.64
Variación (%) 2021-2040	4.74	-3.00	15.33	-0.57	10.88	9.34	-13.39	14.29	66.13	-9.44	44.72	28.98	9.87
Variación (%) 2041-2060	-9.36	-23.70	-7.95	-21.18	-10.56	-2.62	39.27	-26.54	51.32	0.28	28.90	3.50	-9.58

Por otro lado, el escenario RCP 8.5 para el periodo 2021-2040 indica incrementos de precipitación de 4.52% a nivel anual y en el mes de julio un incremento significativo de 40.04%. En el periodo 2041-2060, se evidencia un incremento anual de 6.91%, siendo el incremento más significativo

de 80.66% en noviembre como se ve en la figura 28(b), mientras que en el mes de octubre se presenta una reducción de -26.50%.

Tabla 16. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	75.84	93.89	84.88	30.42	3.27	0.43	0.48	2.01	3.81	8.82	17.12	42.51	363.47
2021-2040 (mm)	77.96	93.70	84.76	34.25	3.29	0.47	0.68	2.18	4.27	7.83	17.20	53.31	379.90
2041-2060 (mm)	66.90	89.61	87.58	35.14	3.12	0.41	0.49	2.39	6.68	6.48	30.92	58.87	388.59
Variación (%) 2021-2040	2.80	-0.20	-0.15	12.59	0.77	9.26	40.04	8.08	11.97	-11.13	0.51	25.42	4.52
Variación (%) 2041-2060	-11.78	-4.56	3.17	15.54	-4.47	-5.00	0.66	18.65	75.35	-26.50	80.66	38.51	6.91

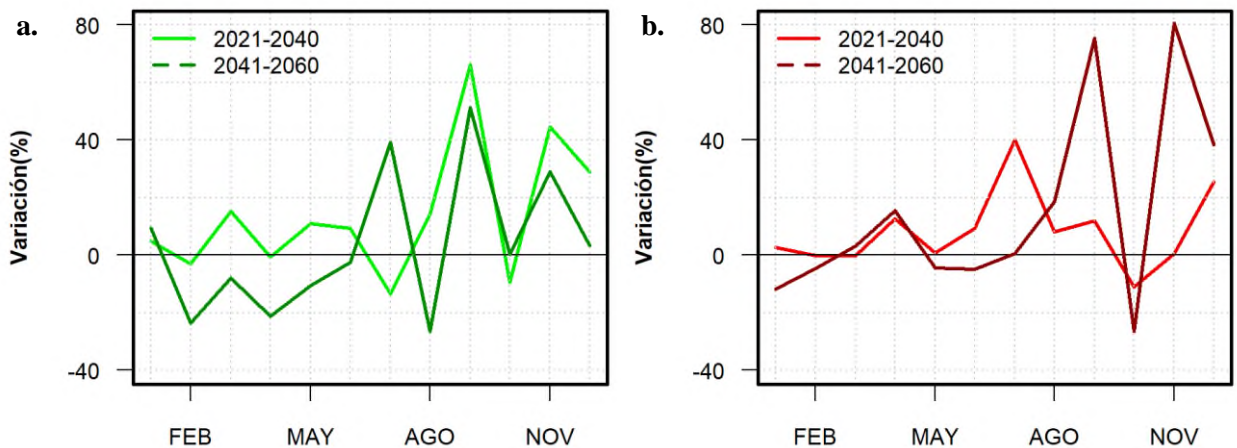


Figura 28. (a) y (b) Variación de la precipitación para el modelo HadGem2-AO escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5

En la Tabla 17 se aprecian los cambios para todos los modelos considerados. El escenario más favorable es HadGem2-AO-RCP2.6 para el periodo 2021-2040 con un incremento en la precipitación de 9.87%. Por el contrario, el escenario más crítico corresponde a HadGem2-AO-RCP2.6 para el periodo 2041-2060 el cual indica una disminución de -9.58% en la época de avenida.

Tabla 17. Variación futura de la precipitación acumulada anual de los modelos considerados

Escenario	Periodo	Variación futura respecto al periodo 1981-2000 (%)			
		HadGem2-AO	MPI-ESM-MR	HadGem2-ES-REMO	MPI-ESM-LR-REMO
RCP 2.6	2021-2040	9.87	7.12	-1.69	-8.28
	2041-2060	-9.58	-1.77	-3.45	-4.62
RCP 8.5	2021-2040	4.52	5.48	-2.73	-8.98
	2041-2060	6.91	4.80	-4.03	0.05

b. TEMPERATURA

La figura 29 muestra el ciclo anual histórico y futuro del modelo HadGem2-AO, en el que se identifica un incremento uniforme en todos los meses. En la tabla 18, se observa para el escenario RCP 2.6-2021-2040 un incremento en la temperatura de 0.78°C a nivel anual. En el mes de octubre se da un mayor incremento a diferencia del mes de diciembre. Para el escenario RCP 2.6-2041-2060, presenta un incremento anual de 1.14°C. En el período de estiaje se da los incrementos específicamente entre los meses de abril y octubre como se ve en la figura 30(a).

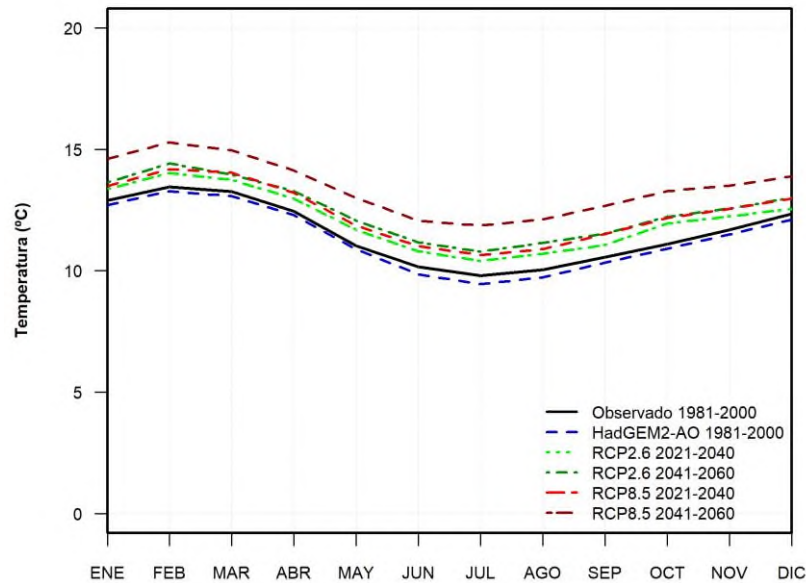


Figura 29. Análisis comparativo entre la temperatura del periodo de referencia y de los escenarios para el modelo HadGem2-AO

Tabla 18. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.70	13.28	13.08	12.28	10.90	9.85	9.45	9.73	10.34	10.91	11.49	12.10	11.34
2021-2040 (°C)	13.37	14.03	13.74	12.98	11.69	10.81	10.40	10.70	11.06	11.94	12.24	12.55	12.13
2041-2060 (°C)	13.64	14.42	13.95	13.28	12.07	11.16	10.79	11.15	11.53	12.23	12.57	13.01	12.48
Variación (°C) 2021-2040	0.67	0.75	0.66	0.69	0.79	0.95	0.95	0.97	0.72	1.04	0.75	0.45	0.78
Variación (°C) 2041-2060	0.94	1.14	0.87	0.99	1.17	1.31	1.34	1.41	1.19	1.32	1.08	0.91	1.14

En la Tabla 19, para el escenario RCP 8.5, periodo 2021-2040 se aprecia un incremento anual de 1.04°C. El incremento de la temperatura se presenta de manera uniforme, siendo este mayor en el mes de octubre, y menor en enero. Para el escenario RCP 8.5 en el periodo 2041-2060, se aprecia un incremento anual de 2.11°C. En el período de estiaje se presenta un calentamiento de hasta

2.42°C a partir del mes de julio hasta octubre como se ve en la figura 30(b). El promedio histórico de 11.34 °C se incrementaría a 13.45°C, convirtiéndose en el escenario más crítico con un incremento de 2.11 °C.

Tabla 19. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.70	13.28	13.08	12.28	10.90	9.85	9.45	9.73	10.34	10.91	11.49	12.10	11.34
2021-2040 (°C)	13.49	14.18	14.04	13.22	11.87	11.02	10.65	10.88	11.51	12.17	12.56	12.96	12.38
2041-2060 (°C)	14.61	15.30	14.96	14.12	13.00	12.08	11.87	12.12	12.67	13.28	13.50	13.89	13.45
Variación (°C) 2021-2040	0.79	0.90	0.96	0.93	0.97	1.16	1.21	1.15	1.17	1.26	1.07	0.87	1.04
Variación (°C) 2041-2060	1.91	2.02	1.88	1.84	2.11	2.22	2.42	2.38	2.33	2.38	2.01	1.79	2.11

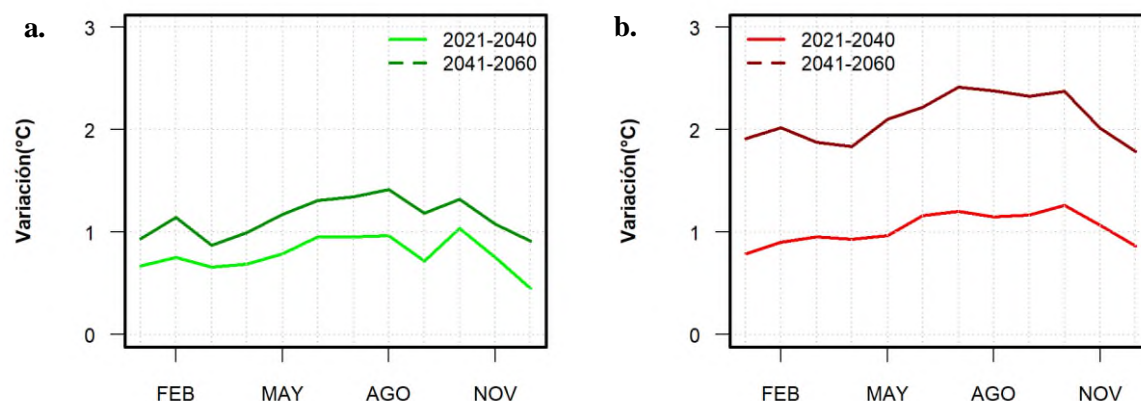


Figura 30. (a) y (b) Variación de la temperatura para el modelo HadGem2-AO bajo el escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5

De acuerdo a los resultados de la Tabla 20, el escenario más favorable es el modelo HadGem2-AO RCP 2.6 para el periodo 2021-2040 con un incremento en la temperatura de 0.78°C. Por otro lado, el escenario más crítico corresponde a HadGem2-ES-REMO-RCP 8.5 para el periodo 2041-2060 con un incremento de 3.01°C.

Tabla 20. Variación futura de la temperatura anual de los modelos considerados

Escenario	Periodo	Variación futura respecto al periodo 1981-2000 (°C)			
		HadGem2-AO	MPI-ESM-MR	HadGem2-ES-REMO	MPI-ESM-LR-REMO
RCP 2.6	2021-2040	+0.78	+1.06	+1.69	+1.21
	2041-2060	+1.14	+1.41	+1.95	+1.39
RCP 8.5	2021-2040	+1.04	+1.52	+1.92	+1.52
	2041-2060	+2.11	+2.65	+3.01	+2.62

3.2 Disponibilidad del recurso hídrico

Para evaluar el cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca del río Ica se comparó los resultados de los escenarios futuros con los escenarios históricos de cada MCG obtenidos por el modelo WEAP, mediante la variación porcentual ($\Delta\%$), que indica el cambio probable en el comportamiento hidrológico. Por lo cual, se analizó el comportamiento de los caudales a nivel anual y mensual, empleando gráficos que permitan observar las variaciones de los caudales históricos y futuros desde el 2021 al 2060.

a. Comportamiento promedio anual

Se presenta la variación promedio anual (%) entre el periodo histórico de los modelos respecto al periodo de referencia en la Tabla 21, donde se muestra una disminución de los caudales. El modelo MPI-ESM-MR muestra una disminución significativa de -17.38 % a nivel anual y con menor variación el modelo HadGem2-AO con un valor de -5.35%.

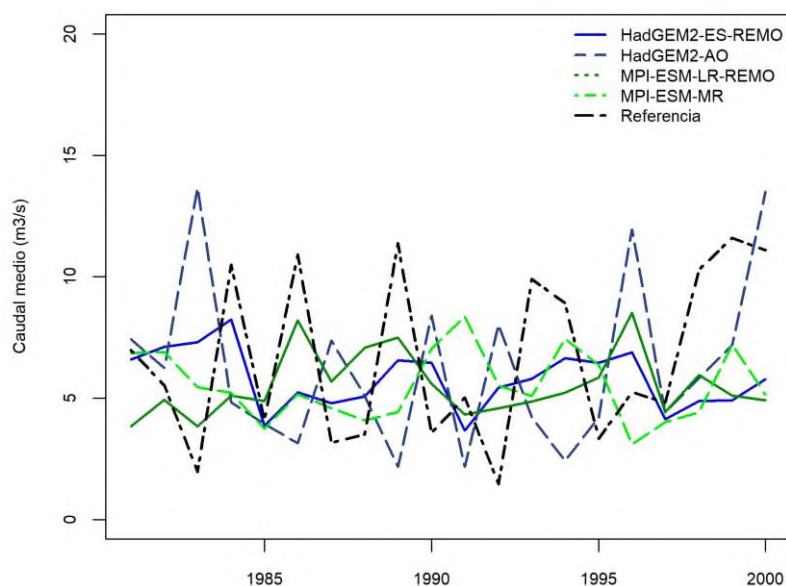


Figura 31. Caudal medio anual para el periodo 1981-2000

Tabla 21. Variación del caudal medio anual de los modelos considerados

Escenario	Modelo	Caudal (m ³ /s)	Variación (%)
Histórico	Referencia	6.67	
	HadGem2AO	6.31	-5.35
	MPI-ESM-MR	5.51	-17.38
Periodo: 1981-2000	HadGem2ES-REMO	5.80	-13.13
	MPI-ESM-LR-REMO	5.53	-17.18

En la figura 32, se observa en los cuatro escenarios para el periodo 2021-2060 una tendencia descendente de los caudales medios, probablemente a causa del aumento de la temperatura. Para el periodo 2021-2040, el escenario más crítico es MPI-ESM-LR-REMO-RCP2.6 con una disminución de -28.33% a nivel anual y el escenario más favorable es HadGem2AO-RCP2.6 con un incremento de 7.86% en el régimen del caudal, sin embargo, para el periodo 2041-2060, presenta una disminución de -32.28% a nivel anual, convirtiéndose en el escenario más crítico. Estos resultados se presentan en la Tabla 22.

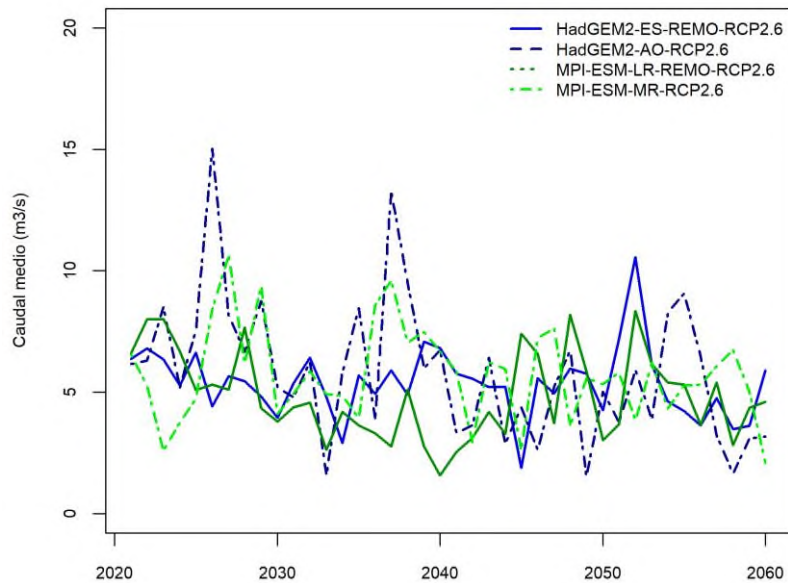


Figura 32. Caudal medio anual para el periodo 2021-2060

Tabla 22. Variación del caudal medio anual de los modelos considerados

Escenario	Modelo	Periodo			
		2021-2040		2041-2060	
		Caudal (m ³ /s)	Variación (%)	Caudal (m ³ /s)	Variación (%)
RCP 2.6	Referencia	6.67	-	6.67	-
	HadGem2AO	7.20	+7.86	4.52	-32.28
	MPI-ESM-MR	6.28	-5.84	5.19	-22.27
	HadGem2ES-REMO	5.53	-17.06	5.22	-21.79
	MPI-ESM-LR REMO	4.78	-28.33	4.89	-26.75

La figura 33, muestra el comportamiento del caudal medio para los cuatro escenarios con tendencia descendente. Para el periodo 2021-2040 el escenario MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5 presenta una mayor variación en la disminución de los caudales de -28.93 % y con menor variación el escenario HadGem2AO-RCP8.5 con disminución de -4.69% a nivel anual. Para el periodo 2041-2060, el escenario más crítico es HadGem2ES-REMO-RCP8.5 con disminución del caudal de -24.33% y con menor variación el escenario HadGem2AO-RCP8.5 con disminución de -6.73% a nivel anual. Estos resultados se presentan en la tabla 23.

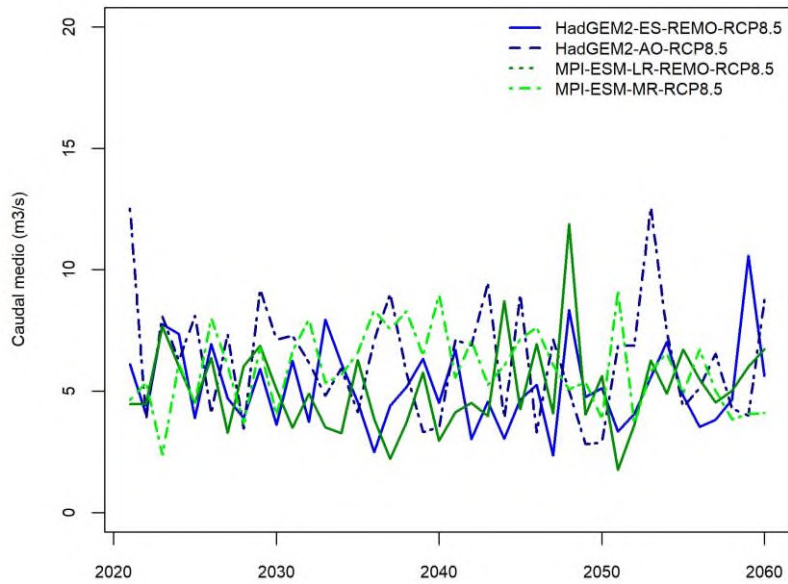


Figura 33. Caudal medio anual para el periodo 2021-2060

Tabla 23. Variación del caudal medio anual de los modelos considerados

Escenario	Modelo	Periodo			
		2021-2040		2041-2060	
		Caudal (m³/s)	Variación (%)	Caudal (m³/s)	Variación (%)
RCP 8.5	Referencia	6.67	-	6.67	-
	HadGem2AO	6.36	-4.69	6.22	-6.73
	MPI-ESM-MR	6.17	-7.48	5.65	-15.27
	HadGem2ES-REMO	5.29	-20.66	5.05	-24.33
	MPI-ESM-LR REMO	4.74	-28.93	5.46	-18.09

b. Comportamiento promedio mensual

De las simulaciones realizadas en el modelo hidrológico WEAP, se presenta el análisis a nivel mensual para el modelo HadGem2AO para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, al presentar el escenario más crítico respecto a los demás modelos. En la figura 34 se muestra el comportamiento de los caudales con un régimen similar y tendencia descendente para ambos escenarios. El ciclo anual de los demás escenarios se visualiza en las Figuras 44 al 46 del ANEXO 1 y la variación del comportamiento en las Figuras del 59 al 64 y en las Tablas del 42 al 47 (ANEXO 2).

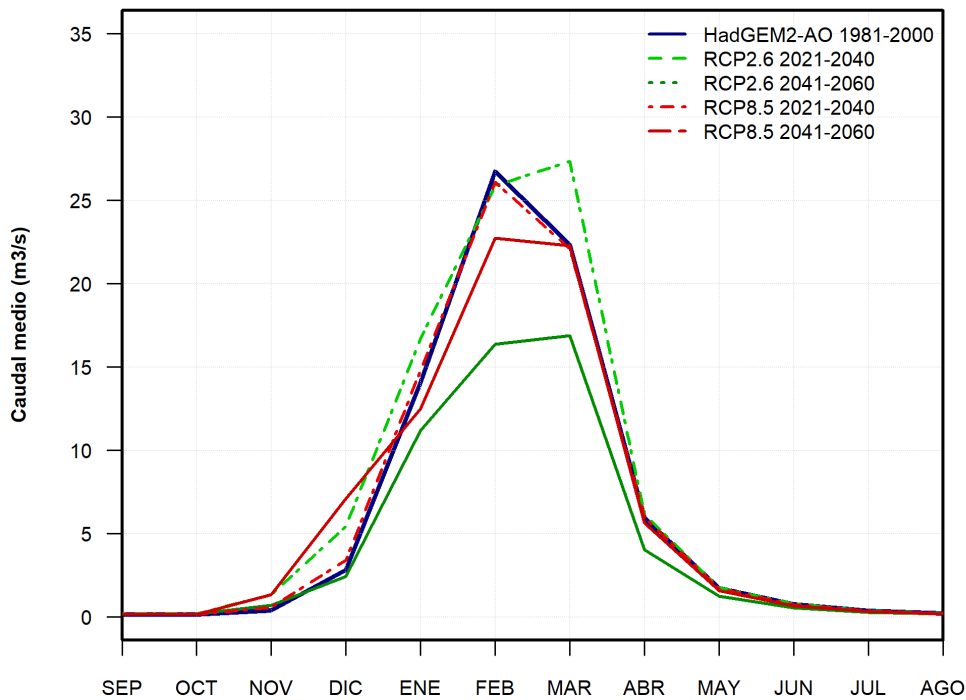


Figura 34. Análisis comparativo entre el caudal del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-AO

En la tabla 24 y 25 se muestra el análisis comparativo entre el periodo de referencia y el escenario RCP2.6 y RCP8.5, donde se observa para el periodo 2021-2040 un incremento del caudal de 13.96% y 0.69% respectivamente a nivel anual. A nivel mensual, para el RCP 2.6 en los meses de noviembre y diciembre presentan un incremento significativo que está relacionado con el incremento de precipitación en estos meses y para el RCP 8.5 presenta una reducción de caudales en la época de estiaje. Para el periodo 2041-2060, el escenario RCP 2.6 presenta una disminución significativa de -28.45% y el escenario RCP8.5 una reducción del caudal de -1.46% a nivel anual. Ambos escenarios indican una disminución del caudal en las épocas de avenida y de estiaje. Ver figura 35, donde se aprecian los cambios de los caudales multianuales mensuales respecto al histórico.

Tabla 24. Caudal del periodo de referencia y el escenario RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (m ³ /s)	14.06	26.73	22.33	5.95	1.73	0.78	0.38	0.23	0.17	0.17	0.41	2.84	6.31
2021-2040 (m ³ /s)	16.69	25.86	27.32	6.17	1.76	0.78	0.38	0.22	0.19	0.20	1.34	5.44	7.20
2041-2060 (m ³ /s)	11.18	16.37	16.89	4.05	1.24	0.56	0.28	0.18	0.15	0.19	0.70	2.42	4.52
Variación (%) 2021-2040	18.66	-3.25	22.32	3.64	1.82	0.46	-1.25	-1.14	16.23	18.80	225.12	91.89	13.96
Variación (%) 2041-2060	-20.46	-38.74	-24.38	-31.93	-28.32	-28.46	-26.00	-21.37	-8.20	10.14	70.41	-14.56	-28.45

Tabla 25. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	14.06	26.73	22.33	5.95	1.73	0.78	0.38	0.23	0.17	0.17	0.41	2.84	6.31
2021-2040 (mm)	14.78	26.08	22.08	5.98	1.72	0.75	0.36	0.21	0.17	0.16	0.60	3.41	6.36
2041-2060 (mm)	12.49	22.71	22.29	5.64	1.58	0.68	0.33	0.20	0.18	0.16	1.33	7.09	6.22
Variación (%) 2021-2040	5.12	-2.44	-1.13	0.56	-0.50	-4.02	-5.63	-5.14	1.02	-7.55	44.69	20.27	0.69
Variación (%) 2041-2060	-11.18	-15.03	-0.22	-5.25	-8.56	12.75	14.61	12.02	4.74	-6.27	223.92	150.08	-1.46

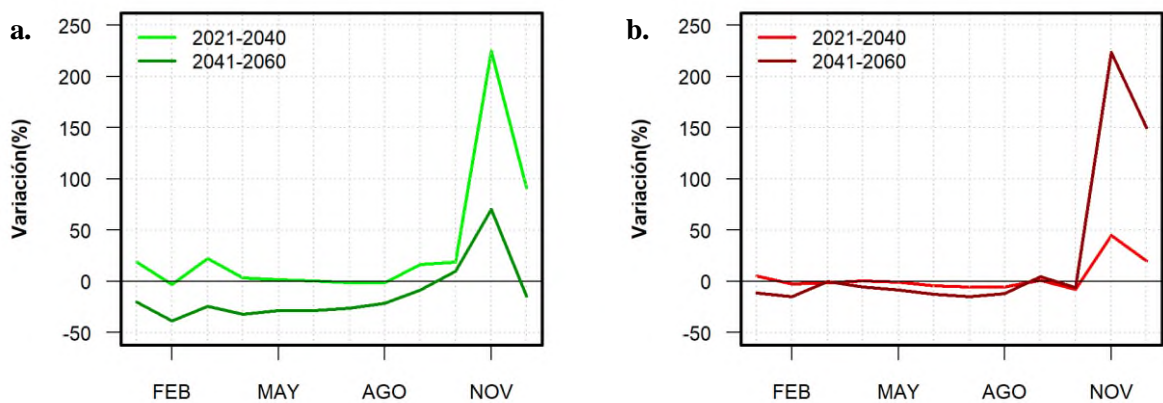


Figura 35. (a) y (b) Variación del caudal para el modelo HadGem2-AO bajo el escenario RCP 2.6 y escenario RCP 8.5

En la Tabla 26 se aprecian los cambios producidos por la influencia del cambio climático en el caudal a nivel anual para los modelos considerados.

Tabla 26. Variación del caudal anual para los modelos considerados

Escenario	Periodo	Variación futura respecto al periodo 1981-2000 (%)			
		HadGem2-AO	MPI-ESM-MR	HadGem2-ES-REMO	MPI-ESM-LR-REMO
RCP 2.6	2021-2040	+13.96	+13.97	-4.53	-13.45
	2041-2060	-28.45	-5.93	-9.97	-11.55
RCP 8.5	2021-2040	+0.69	+11.98	-8.67	-14.18
	2041-2060	-1.46	+2.55	-12.89	-1.10

3.3 Resumen de resultados

a. Comportamiento promedio anual

En la Tabla 27, se presentan los caudales medio anual para los ocho escenarios hidrológicos proyectados en la estación hidrométrica La Achirana. Para el periodo 2021-2040, el escenario más crítico es MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5 y el escenario más favorable es HadGem2AO-RCP2.6. Para el periodo 2041-2060, el escenario más crítico es HadGem2AO-RCP2.6 y el escenario más favorable es HadGem2AO-RCP2.6.

Tabla 27. Caudal medio anual histórico y futuro en la estación hidrométrica La Achirana

Periodo	Escenario	Caudal medio anual (m ³ /s)
Histórico	HadGem2-AO	6.31
	MPI-ESM-MR	5.51
	HadGem2-ES-REMO	5.80
	MPI-ESM-LR-REMO	5.53
HadGem2-AO-RCP2.6		7.20
Futuro 2021-2040	HadGem2-AO-RCP8.5	6.36
	MPI-ESM-MR-RCP2.6	6.28
	MPI-ESM-MR-RCP8.5	6.17
	HadGem2-ES-REMO-RCP2.6	5.53
	HadGem2-ES-REMO-RCP8.5	5.29
	MPI-ESM-LR-REMO-RCP2.6	4.78
	MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5	4.74
	HadGem2-AO-RCP2.6	4.52
Futuro 2041-2060	HadGem2-AO-RCP8.5	6.22
	MPI-ESM-MR-RCP2.6	5.19
	MPI-ESM-MR-RCP8.5	5.65
	HadGem2-ES-REMO-RCP2.6	5.22
	HadGem2-ES-REMO-RCP8.5	5.05
	MPI-ESM-LR-REMO-RCP2.6	4.89
	MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5	5.46

b. Comportamiento promedio mensual

En el periodo 2021-2040, el escenario “más favorable” es HadGem2-AO-RCP2.6 con un aumento de 13.96% del caudal que corresponde a un incremento de la precipitación. El escenario “más crítico” es el MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5 con una disminución del caudal de -14.18% que corresponde a la disminución de la precipitación e incremento de la temperatura.

Tabla 28. Influencia del cambio climático en el caudal periodo 2021-2040

Modelo	Escenario	Variación futura		
		Precipitación (%)	Temperatura (°C)	Caudal (%)
HadGem2-AO	RCP 2.6	9.87	+0.78	13.96
	RCP 8.5	4.52	+1.04	0.69
MPI-ESM-MR	RCP 2.6	7.12	+1.06	13.97
	RCP 8.5	5.48	+1.52	11.98
HadGem2-ES-REMO	RCP 2.6	-1.69	+1.69	-4.53
	RCP 8.5	-2.73	+1.92	-8.67
MPI-ESM-LR-REMO	RCP 2.6	-8.28	+1.21	-13.45
	RCP 8.5	-8.98	+1.52	-14.18

En la figura 36 se presentan los ocho escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2021-2040. En la época de avenida, el escenario HadGem2-AO-RCP2.6 alcanza valores de 16.69 m³/s, 25.86 m³/s, 27.32 m³/s y 6.17 m³/s; mientras que el escenario MPI-ESM-LR-REMO-RCP8.5 alcanza valores de 7.75 m³/s, 22.01 m³/s, 19.59 m³/s y 3.90 m³/s de caudal.

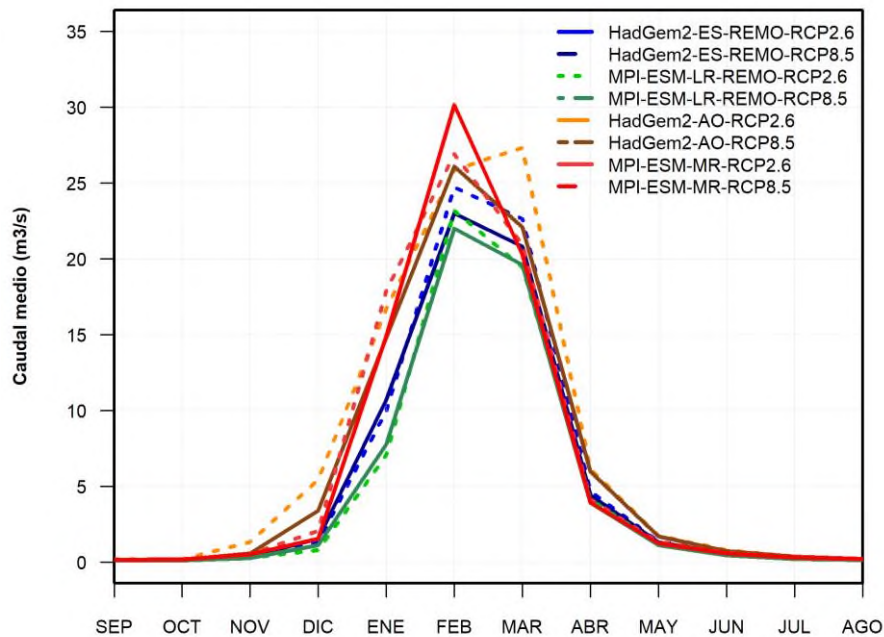


Figura 36. Escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2021-2040

Para el periodo 2041-2060, el escenario “más favorable” es MPI-ESM-MR-RCP8.5 con un aumento de 2.55% del caudal que corresponde a un incremento de la precipitación. El escenario “más crítico” es el HadGem2-AO-RCP2.6 con variación en el caudal de -28.45% por disminución de la precipitación e incremento de la temperatura.

Tabla 29. Variación Influencia del cambio climático en el caudal periodo 2041-2060

Modelo	Escenario	Variación futura		
		Precipitación (%)	Temperatura (°C)	Caudal (%)
HadGem2-AO	RCP 2.6	-9.58	+1.14	-28.45
	RCP 8.5	6.91	+2.11	-1.46
MPI-ESM-MR	RCP 2.6	-1.77	+1.41	-5.93
	RCP 8.5	4.80	+2.65	2.55
HadGem2-ES-REMO	RCP 2.6	-3.45	+1.95	-9.97
	RCP 8.5	-4.03	+3.01	-12.89
MPI-ESM-LR-REMO	RCP 2.6	-4.62	+1.39	-11.55
	RCP 8.5	0.05	+2.62	-1.10

En la figura 37 se presentan los ocho escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2041-2060. En la época de avenida, el escenario MPI-ESM-MR-RCP8.5 alcanza valores de 15.32 m³/s, 25.30 m³/s, 18.78 m³/s y 3.60 m³/s; mientras que el escenario HadGem2-AO-RCP2.6 alcanza valores de 11.18 m³/s, 16.37 m³/s, 16.89 m³/s y 4.05 m³/s de caudal.

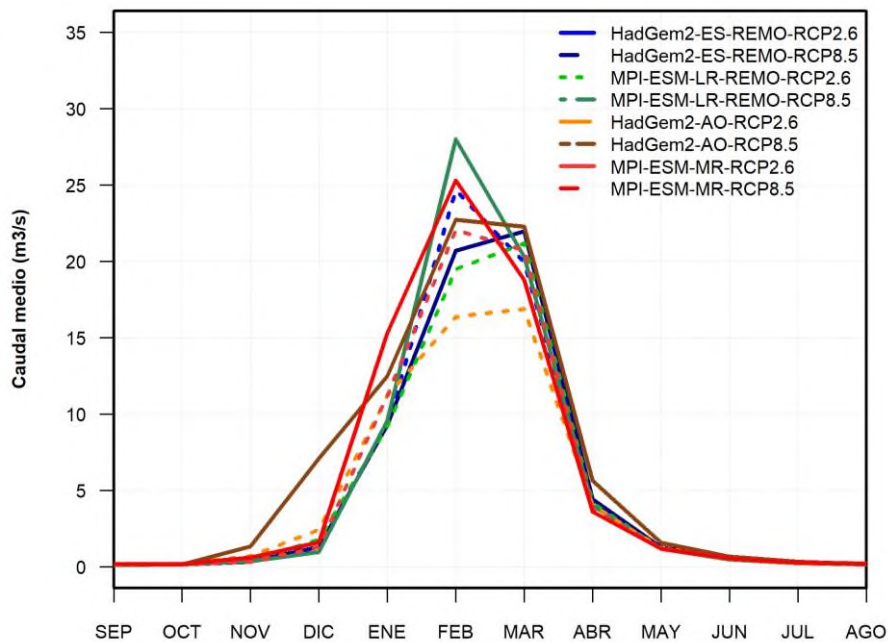


Figura 37. Escenarios hidrológicos proyectados en la estación La Achirana para el periodo 2041-2060

IV. DISCUSIÓN

En el presente capítulo se discute los resultados obtenidos del modelo hidrológico WEAP y se comprueba las hipótesis del presente trabajo de investigación.

- Respecto al primer objetivo específico, Determinar la influencia del cambio climático en las variables climatológicas de la cuenca río Ica-Alto Pampas. Se obtuvo para el periodo 2021-2040, que el régimen de precipitación para el escenario de bajas emisiones RCP 2.6 presenta una disminución de hasta -8.28% para los modelos regionalizados de CORDEX (HadGem2-ES - REMO y MPI-ESM-LR – REMO), a diferencia, en los modelos globales del CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) se obtuvo un incremento de hasta 9.87%. Considerando el escenario de altas emisiones RCP 8.5, se apreció una disminución de hasta -8.98% para los modelos regionalizados y un incremento de hasta 5.48% para los modelos globales. Así mismo, se evidenció un aumento en la temperatura de hasta +1.06 °C en los modelos globales y un aumento de hasta +1.69 para los modelos regionalizados considerando el escenario RCP 2.6 y de +1.52 °C y +1.92 °C en los modelos globales y regionalizados respectivamente para el escenario RCP 8.5.

Para esta discusión la Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático realizado por el Ministerio del Ambiente [9], nos indica que los modelos climáticos (MPI-ESM-MR, CCSM4-NCAR, HadGem2-AO, HadGem2-ES) utilizados en la cuenca del río Ica para el año 2030, proyectan para el escenario de emisión RCP 8.5 cambios en la precipitación con reducción de hasta -5.4% con una variabilidad de +/-30% para la zona de desierto y de +/-15% para la zona de los andes y la Puna, mientras que la temperatura alcanzaría aumentos de entre +1.4°C a +1.5°C ,lo cual indicaría una tendencia hacia el calentamiento.

Por lo tanto, de lo mencionado anteriormente y los resultados obtenidos en esta investigación, se cumple el objetivo habiendo obtenido resultados similares, que nos indica que el cambio climático influye en las variables climatológicas con cambios en los promedios del clima, por lo tanto, dichas condiciones contribuyen a la configuración del régimen hídrico en un futuro.

- Respecto al segundo objetivo específico, Determinar la influencia de los parámetros del método de humedad de suelo para la calibración y validación del modelo hidrológico WEAP. Según la “Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales” elaborada

por Freddy Soria [8] , para evaluar el desempeño de un modelo hidrológico cuantitativamente se emplea indicadores estadísticos como el Nash-Sutcliffe, cuando el valor sea más cerca de 1 mejor es la correspondencia entre los datos observados y simulados, y el Bias, entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulado. Así mismo, indica que la calidad de la calibración depende de la calidad de los datos y del set de parámetros que describan mejor la respuesta de la cuenca estudiada. En esta investigación, para realizar la simulación con el modelo hidrológico WEAP se determinó los parámetros que intervienen en el método de humedad de suelo: Sw, Dw, Z1, Z2, Kc, RRF, Ks, Kd y f, a partir de valores referenciales tomados de la literatura que aplica el modelo hidrológico en diferentes ambientes geográficos-climáticos. En el proceso de calibración manual, los parámetros con mayor sensibilidad fueron Sw, RRF y Ks, al querer aumentar la respuesta de los caudales pico en época de avenida y los parámetros Kd y f al querer disminuir los caudales base en época de estiaje, cuyos valores de caudales llegan a ser 0 m³/s. Encontrado el conjunto de parámetros óptimos, se obtuvo un índice de Nash de 0.73 y Bias de 4% para la calibración y para la validación, índice de Nash de 0.70, Bias de -6%, lo cual indica estadísticamente un buen ajuste. Por lo tanto, se comprueba que encontrando los parámetros óptimos del método de humedad de suelo se obtiene una simulación aceptable entre los datos observados y simulados tanto para la calibración y la validación del modelo hidrológico WEAP; y para evaluar el desempeño del modelo se empleó indicadores estadísticos como el índice de Nash y Bias.

- Respecto al tercer objetivo específico, Determinar la influencia de los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-Alto Pampas, en los periodos 2021-2040 y 2041-2060. Según el estudio Cambio climático en las cuencas de los ríos Ica y Pisco realizado por la Cooperación Alemana (GIZ) en alianza estratégica con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) [13] , menciona que cualquier variación en la dinámica de las precipitaciones en la parte alta de la cuenca del río Ica afecta la disponibilidad de agua en sus partes media y baja. Por lo cual, es consecuente con los resultados obtenidos, donde se muestra que el caudal promedio anual y mensual disminuye para los escenarios futuros y con mayor variación en la época de avenida.

De lo mencionado anteriormente, se comprueba que en los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 al haber variaciones en los promedios del clima, la disponibilidad del recurso hídrico en el río Ica se ve influida proyectando cambios en el régimen hídrico con tendencia descendente de los caudales medios para los periodos 2021-2040 y 2041-2060.

V. CONCLUSIONES

- El cambio climático influye en el comportamiento futuro de la precipitación y temperatura para los ocho escenarios proyectados a partir de los modelos globales del CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) y los modelos regionalizados de CORDEX (HadGem2-ES-REMO y MPI-ESM-LR-REMO).

La precipitación presenta para el periodo 2021-2040 un incremento promedio de 1.76% para el escenario de bajas emisiones RCP 2.6 y considerando el escenario de alta emisión RCP 8.5, una disminución promedio de -0.43%. Para el periodo 2041-2060 registra una disminución promedio de -4.86% para el escenario RCP 2.6 y un incremento promedio de 1.93% para el escenario RCP 8.5.

La temperatura presenta para el periodo 2021-2040 un aumento promedio de 1.2°C considerando el escenario RCP 2.6 y 1.5 °C para el escenario RCP 8.5. Para el periodo 2041-2060, es en promedio +1.5°C para el escenario RCP 2.6 y de +2.6°C para el escenario RCP 8.5.

- El set de parámetros del método de humedad de suelo establecidos permitió una correcta simulación de los caudales en el modelo hidrológico WEAP, obteniendo estadísticamente un rendimiento “bueno” del modelo en la calibración (1964-1984) con valores de índice de Nash de 0.73, BIAS de +4% y RSR 0.52 y “muy bueno” en la validación (1985-2005) con valores de índice de Nash de 0.70, BIAS de -6% y RSR 0.55, es decir una buena correlación entre los caudales simulados y los observados.

El análisis de consistencia de la información pluviométrica observada presentó estadísticamente resultados confiables para obtener una adecuada representación de la estacionalidad de los caudales en el punto de aforo: estación hidrométrica La Achirana.

Los parámetros obtenidos por el método de humedad de suelo permitieron representar satisfactoriamente el comportamiento hídrico de la cuenca para el periodo histórico (1984-2005) y estimar la oferta hídrica del río Ica para el periodo futuro (2021-2060).

- El cambio climático influye en la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca río Ica-alto pampas con la disminución de los caudales para los escenarios de emisión RCP 2.6 y 8.5 en los periodos analizados.

Los caudales promedios anuales y mensuales de los ocho escenarios hidrológicos proyectados en la estación hidrométrica La Achirana presentan una tendencia descendente en los periodos 2021-2040 y 2041-2060 respecto al periodo histórico 1981-2000.

La predicción climática de los modelos globales del CMIP5 (HadGem2-AO, MPI-ESM-MR) y los modelos regionalizados de CORDEX (HadGem2-ES-REMO y MPI-ESM-LR-REMO) permitieron conocer la disponibilidad hídrica futura de la cuenca en estudio.

VI. RECOMENDACIONES

- Implementar una estación de aforos en la parte baja de la cuenca, de tal manera que registre los aportes de las quebradas de Cansas, Yauca del Rosario y Tingue que desembocan al río Ica por la margen izquierda causando daño a la población y áreas de cultivo. Esto permitiría la calibración y validación de futuros modelos hidrológico con otro punto de aforo además de la estación de la Achirana.
- Reactivar la estación hidrométrica Pariona ubicada en la sección de descarga de la laguna Parionacocha permitiría cuantificar el volumen de agua que aporta el Sistema Choclococha al río Ica y poder ingresar dicha información como “Caudales de derivación” en el esquema desarrollado en el modelo hidrológico WEAP, sin necesidad de discretizar los caudales observados en la estación la Achirana.
- Continuar la investigación, evaluando la influencia del cambio climático en la disponibilidad hídrica del Sistema Choclococha mediante un modelamiento hidrológico; considerando que los resultados de esta investigación proyectan escenarios críticos por la disminución de los caudales propios del río Ica a nivel anual y mensual para el periodo 2021-2040 y 2041-2060.
- Utilizar la metodología empleada en esta investigación para el procesamiento de data climática obtenida de modelos globales y modelos regionalizados de CORDEX.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030,» Lima-Perú, 2009.
- [2] Stockholm Environment Institute (SEI), «Guía metodológica: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP,» Santiago-Boston, 2009.
- [3] Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC Perú), «Vulnerabilidad actual y condiciones de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático de las poblaciones rurales del Sur Andino del Perú.El caso de la subcuenca del Río Mollebamba,» Apurímac, 2011.
- [4] Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), «Cambio Climático 2013,» Universidad de Cambridge, USA, 2013.
- [5] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050: Cuenca del río Piura,» Lima-Perú, 2005.
- [6] G. Filippo, J. Colin and R. A. Ghassem, "Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework," *WMO Bulletin*, vol. 58(3), pp. 175-183, 2009.
- [7] M. A. Lema Changoluisa y V. C. Plaza Quezada, Modelación Hidrológica de la Cuenca Alta y Media del Rio Pastaza aplicando el modelo de simulación WEAP (Water Evaluation And Planning System), Quito, Ecuador, 2009.
- [8] F. Soria, «Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales,» Universidad Católica Boliviana "San Pablo", La Paz, Bolivia, 2016.
- [9] Ministerio del Ambiente (MINAM), «Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.El Perú y el Cambio Climático,» Lima,Perú, 2016.
- [10] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú.Proyecto AMICAF,» Lima,Perú, 2014.
- [11] Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos , «Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Pampas,» Ministerio de Agricultura, Autoridad Nacional del Agua, Administración Local de Agua Ayacucho, Lima, Perú, 2010.
- [12] G. Ccori Puma, Modelación en WEAP y RS MINERVE para la proyección hidrológica futura de la microcuenca Mchique – Sincos – Huancayo, Lima, Perú.: Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, 2019.
- [13] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI) ; Cooperación Alemana al desarrollo – GIZ, «Cambio climático en las cuencas de los Ríos Ica y Pisco: Proyecciones al 2030,» Lima, Perú., 2016.

- [14] W. Murillo, «La investigación científica,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos15/invest-cientifica/investcientifica.shtm>.
- [15] M. Tamayo, El proceso de la investigación científica, Editorial Limusa, 2004.
- [16] J. McClave, G. Benson y T. Sincich, Statistics for business and economics, vol. Tenth edition, New York: Pearson, Prentice Hall, 2008.
- [17] Peña, F.; Sánchez, M.; Pari, W. ;Instituto Nacional Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), «Hidrogeología de la cuenca del río Ica,» Lima,Perú, 2010.
- [18] Olivares, P. A.; Taype, P. V.; Castro, S;Instituto Nacional Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), «Estudio geodinámico de la cuenca del río Ica: Departamento Ica-Huancavelica,» Lima, Perú, 1994.
- [19] Programa de Formalización de Derechos de Uso del Agua (PROFODUA), «Propuesta de Asignación de Agua Superficial, Valle de Ica,» 2006.
- [20] H. Llinas, Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad, Barranquilla: Ediciones Uninorte, 2006, pp. 72-76.
- [21] J. Espinoza, «El método del vector regional de índices pluviométricos,» 2005. [En línea]. Available: <http://sites.google.com/site/jhancarloespinoza>.
- [22] P. Vauchel, «Hydraccess: Software for Management and processing of Hydro – meteorological data software,» 2005. [En línea]. Available: www.mpl.ird.fr/hybam/utills/hydracces.htm.
- [23] C. Teutschbein and J. Seibert, Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?, vol. 17(12), Hydrology and Earth System Sciences, 2013, pp. 5061-5077.
- [24] G. Lenderink, A. Buishand and W. Deursen, Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach., vol. 11(3) , Hydrology and Earth System Sciences, 2007, pp. 1145-1159..
- [25] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: proyecciones al año 2030 en la Región Ica,» Lima,Perú, 2013.
- [26] Castro, Los Modelos Climáticos globales, Santander, España: Universidad de Cantabria , 2007.
- [27] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Impacto del cambio socio-económico y climático en la Gestión de Recursos Hídricos (Cuenca del río Chancay-Huaral),» Lima,Perú, 2015.
- [28] C. Junquas, K. Takahashi y J. Espinoza, *Modelación y cambio climático*, Perú: Foro Internacional Cambio Climatico, 2014.
- [29] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), «Vulnerabilidad Climática de los Recursos Hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y Parte Alta Del Mantaro,» Lima, Perú, 2016.
- [30] Avalos, G.; Oria, C.; Jacome, G.; Acuña, D.; Llacza, A.; Cubas, F., «Cambio climático en la cuenca del río Mantaro, Proyecciones para el año 2030,» Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima, Perú., 2013.
- [31] B. Oviedo y G. León, « Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales,» Bogotá, Colombia, 2010.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Análisis comparativo de la precipitación, temperatura y caudal

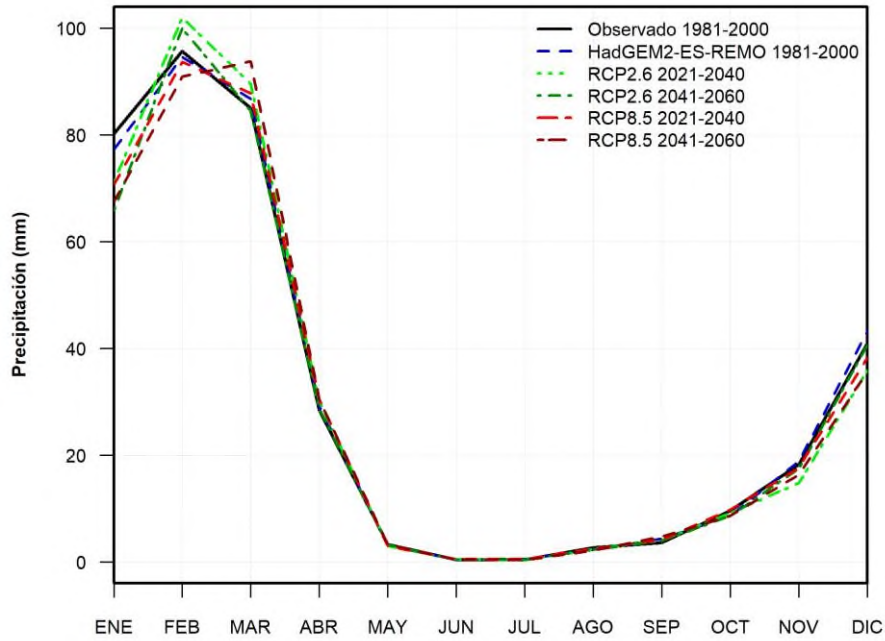


Figura 38. Precipitación del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-ES-REMO

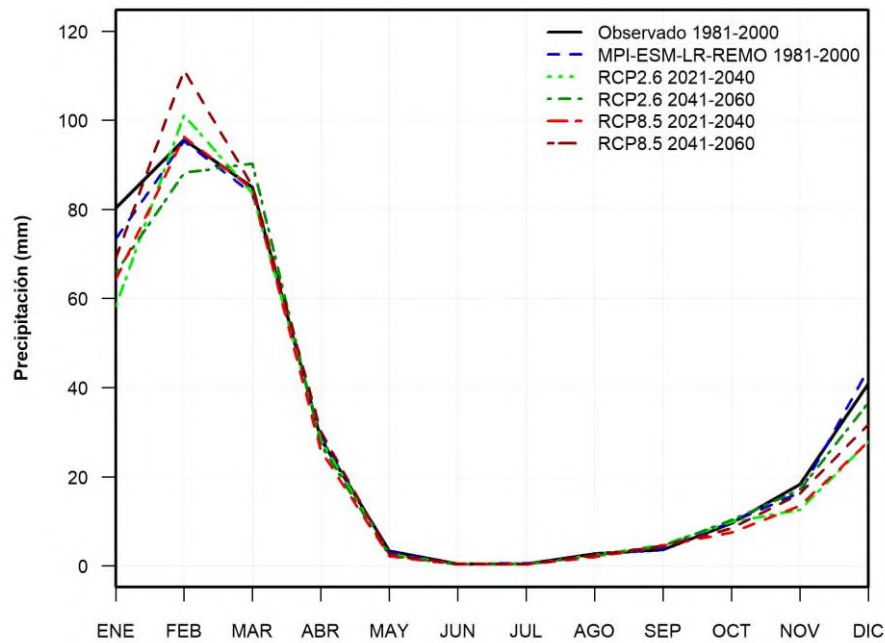


Figura 39. Precipitación del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-LR-REMO

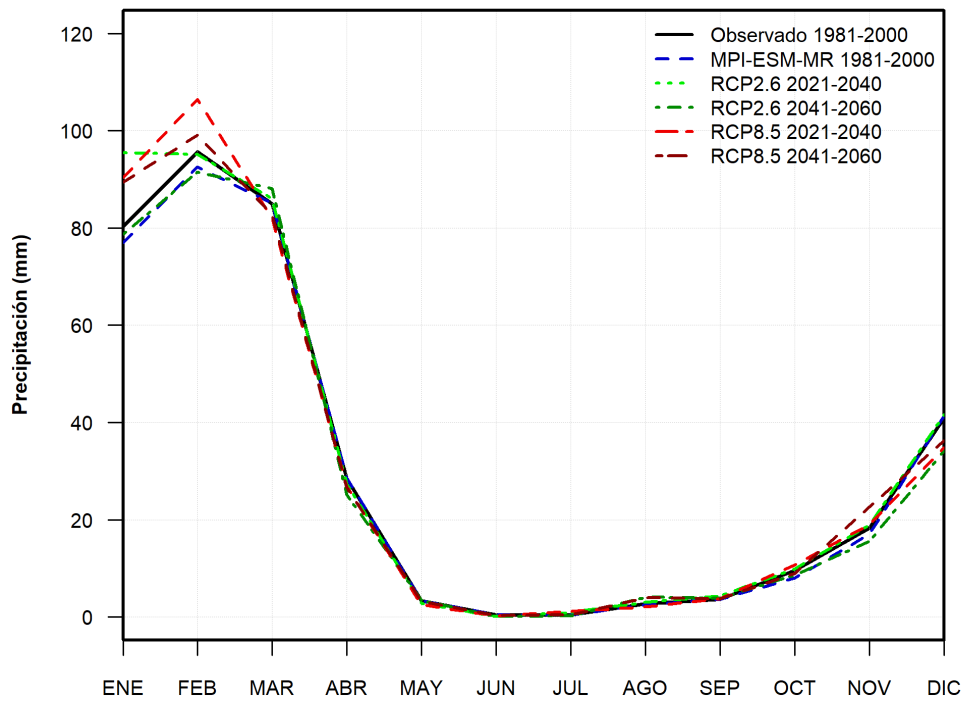


Figura 40. Precipitación del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-MR

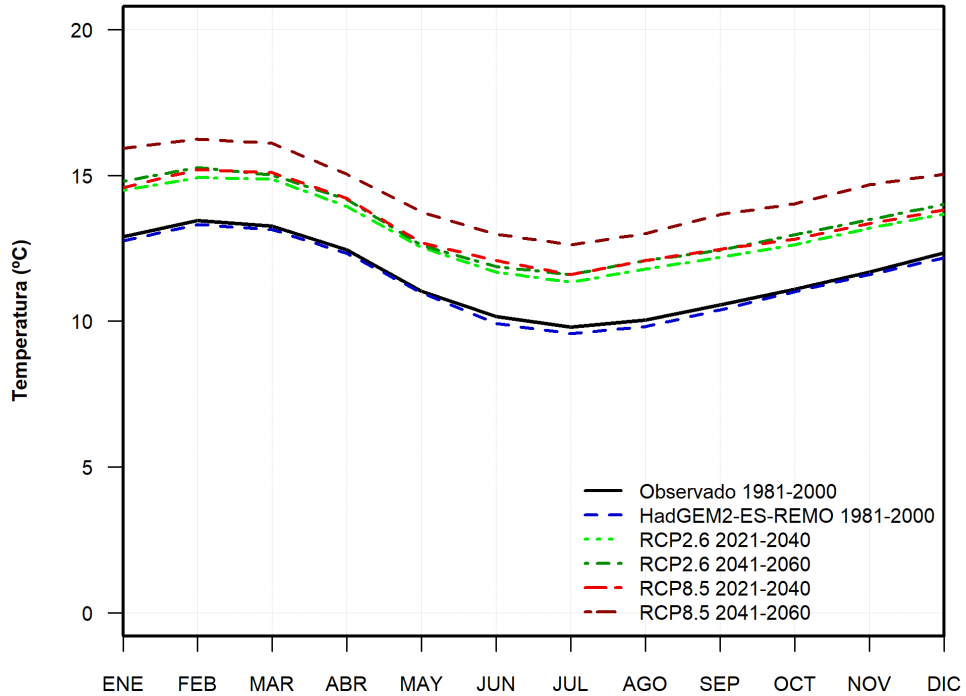


Figura 41. Temperatura del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-ES-REMO

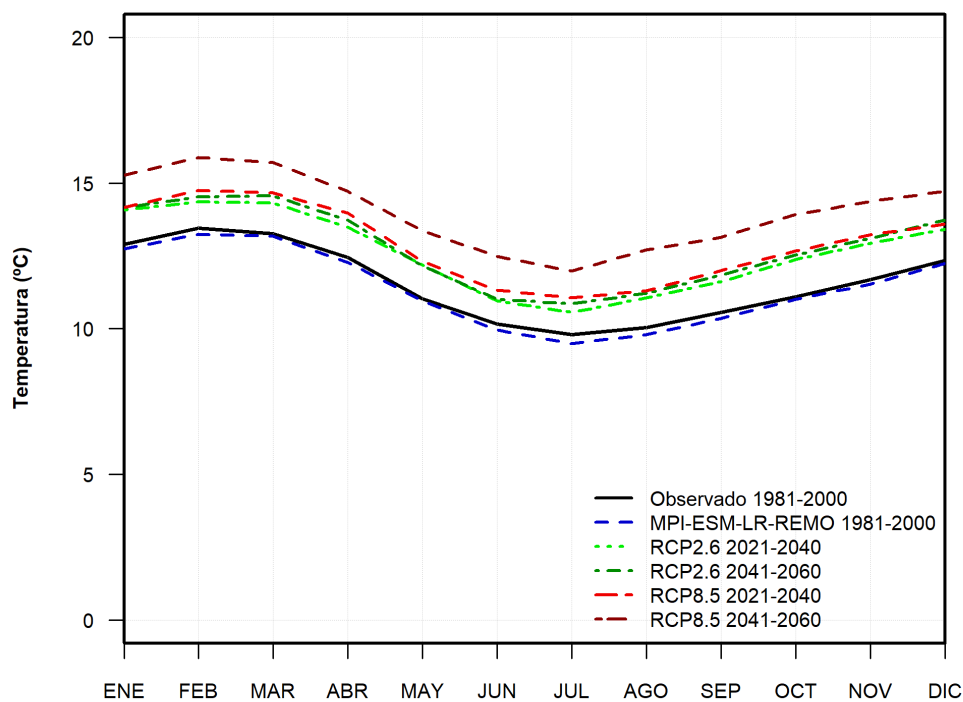


Figura 42. Temperatura del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-LR-REMO

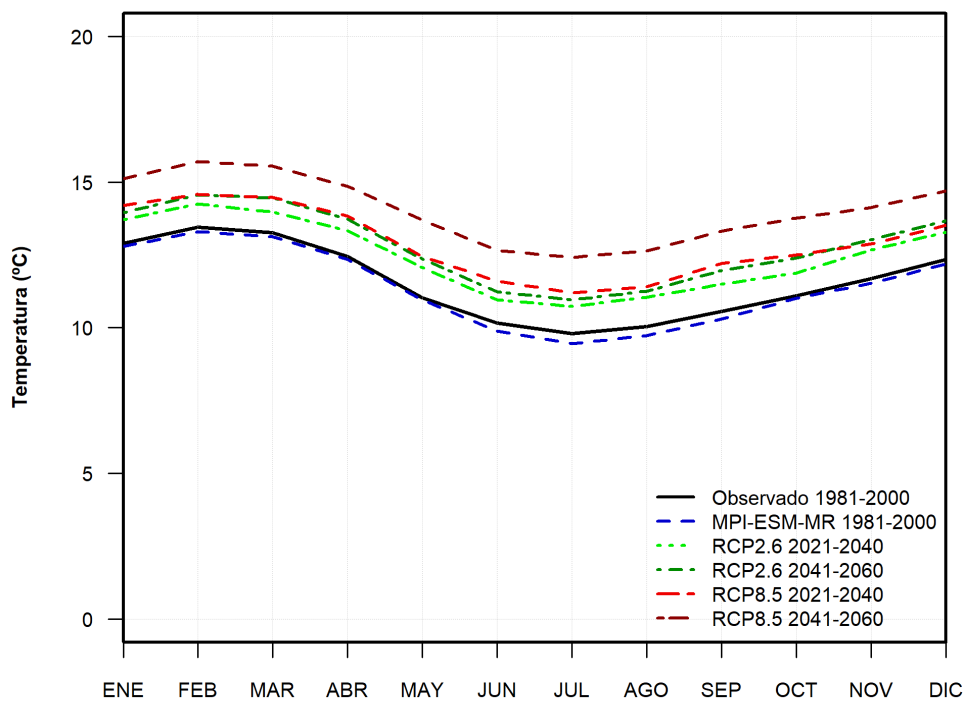


Figura 43. Temperatura del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-MR

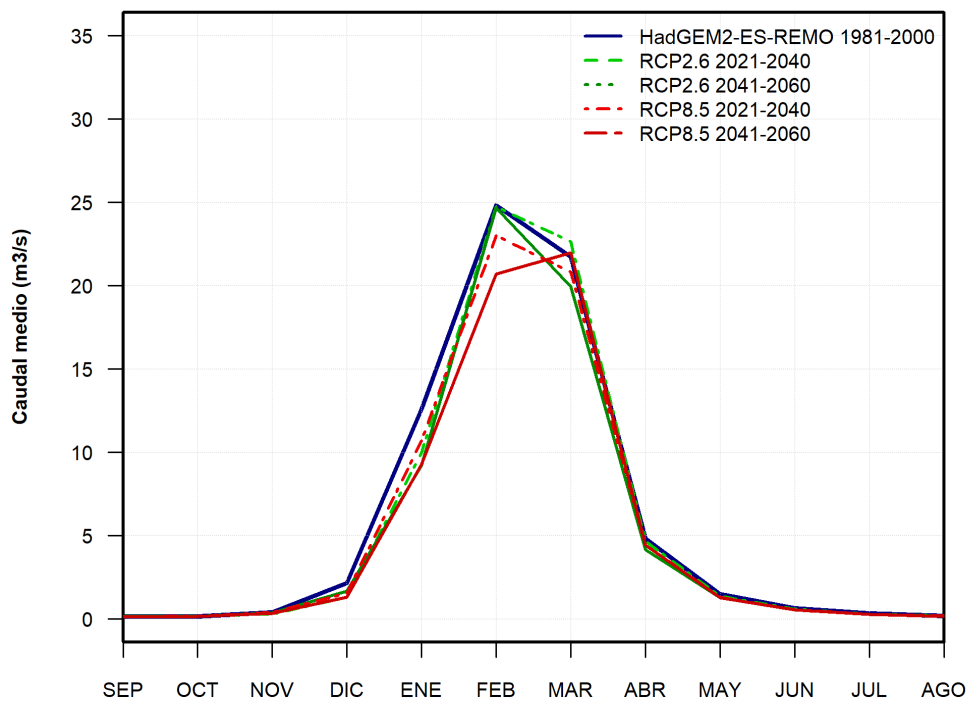


Figura 44. Análisis comparativo entre el caudal del periodo de referencia y los escenarios para el modelo HadGem2-ES-REMO

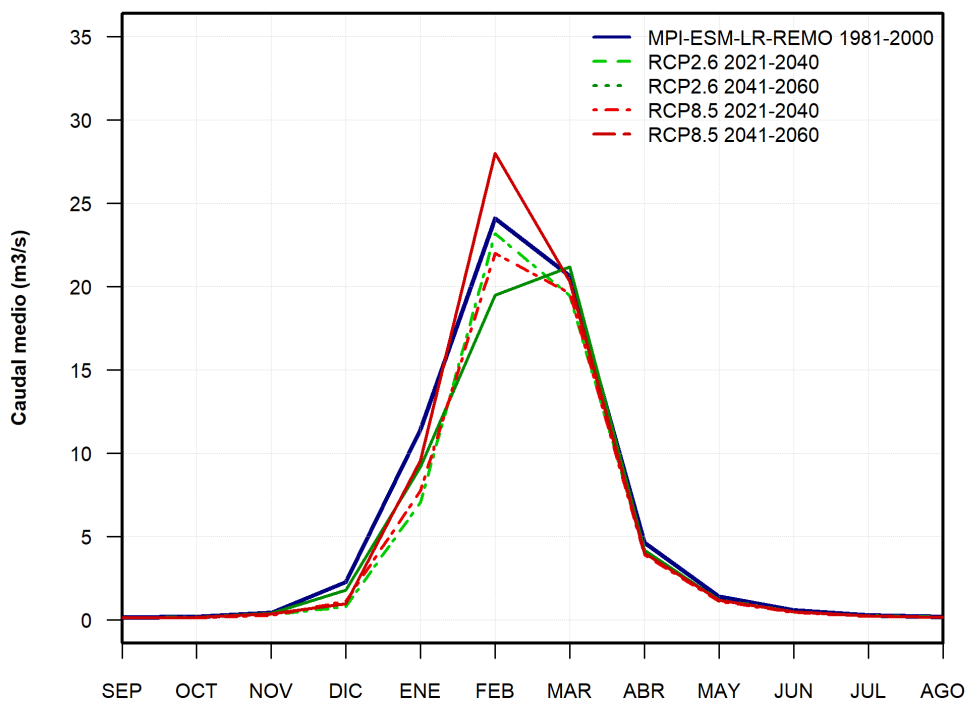


Figura 45. Análisis comparativo entre el caudal del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-LR-REMO

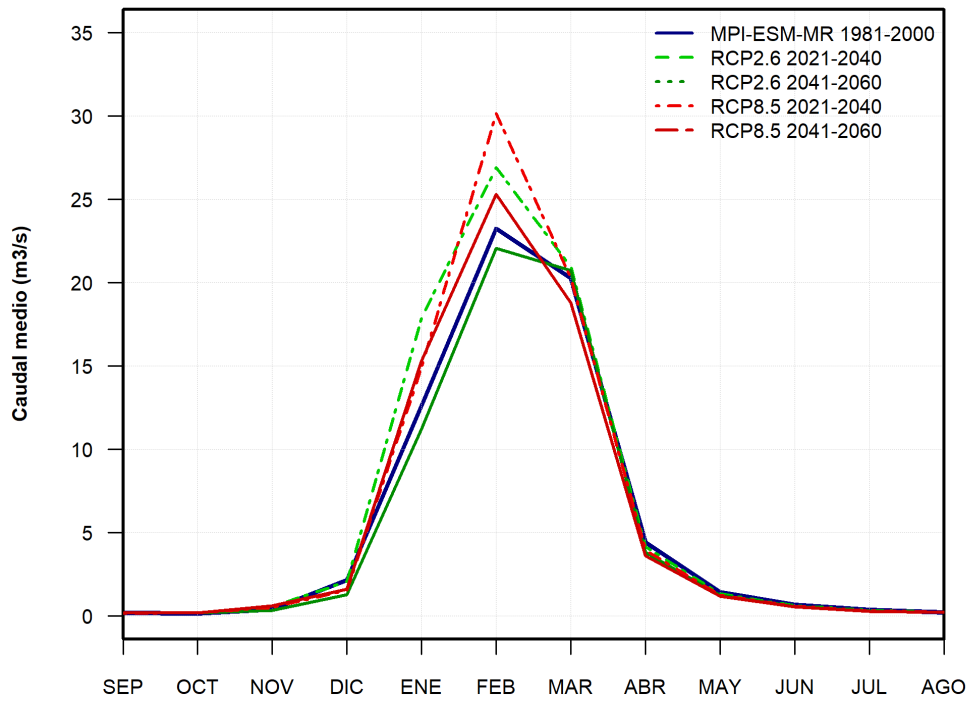


Figura 46. Análisis comparativo entre el caudal del periodo de referencia y los escenarios para el modelo MPI-ESM-MR

Anexo 2. Variación mensual de la precipitación, temperatura y caudal

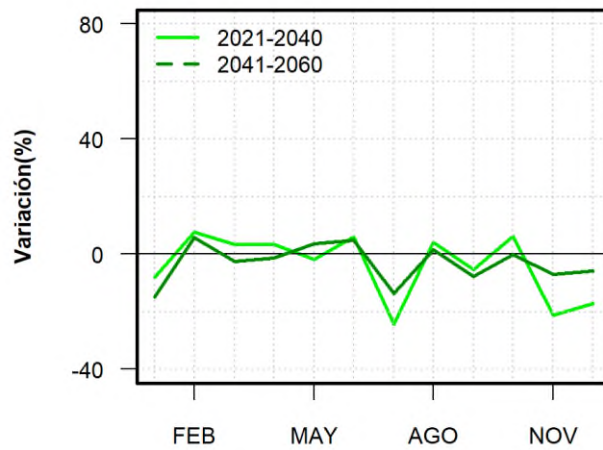


Figura 47. Variación de la precipitación para el modelo HadGem2-ES-REMO escenario RCP 2.6

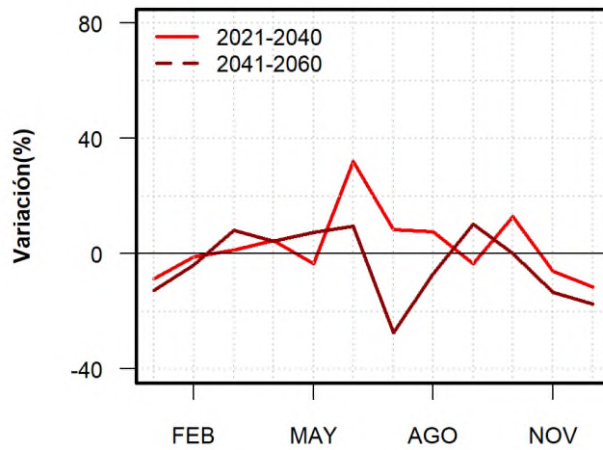


Figura 48. Variación de la precipitación para el modelo HadGem2-ES-REMO escenario RCP 8.5

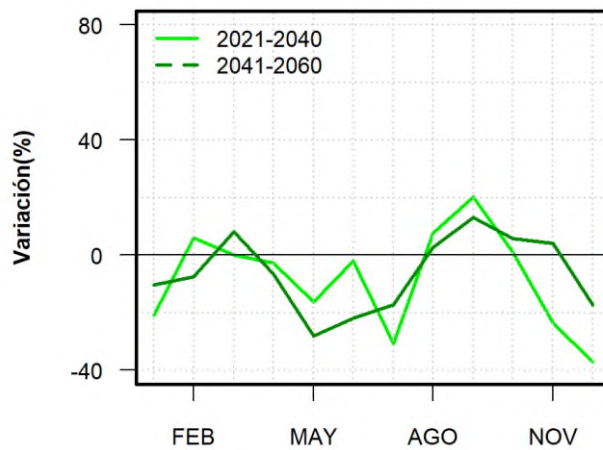


Figura 49. Variación de la precipitación para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 2.6

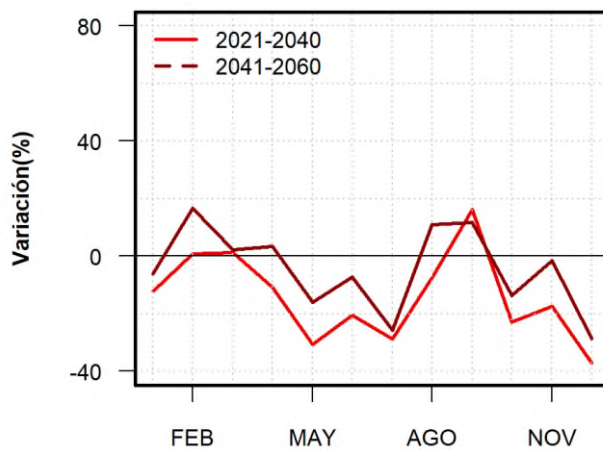


Figura 50. Variación de la precipitación para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 8.5

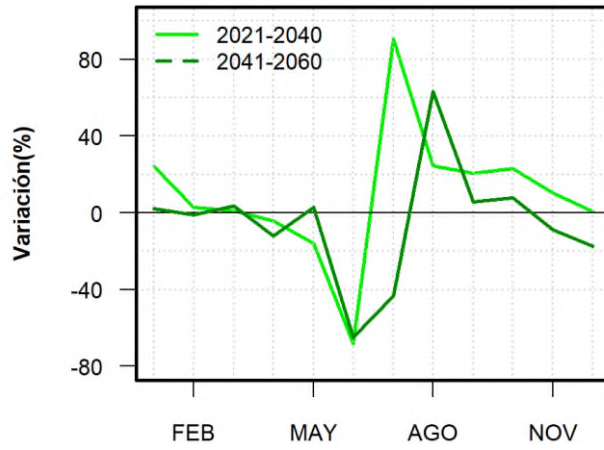


Figura 51. Variación de la precipitación para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 2.6

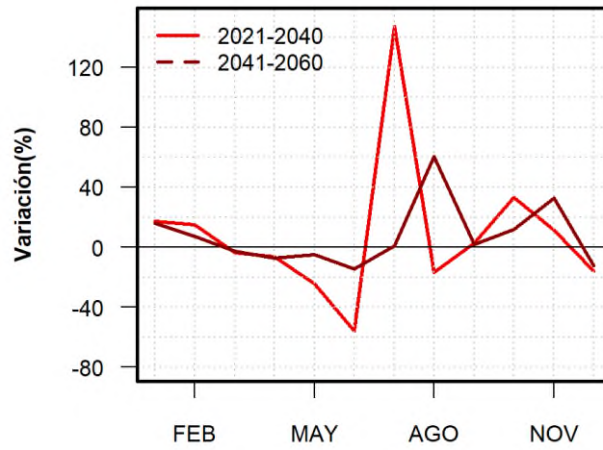


Figura 52. Variación de la precipitación para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 8.5

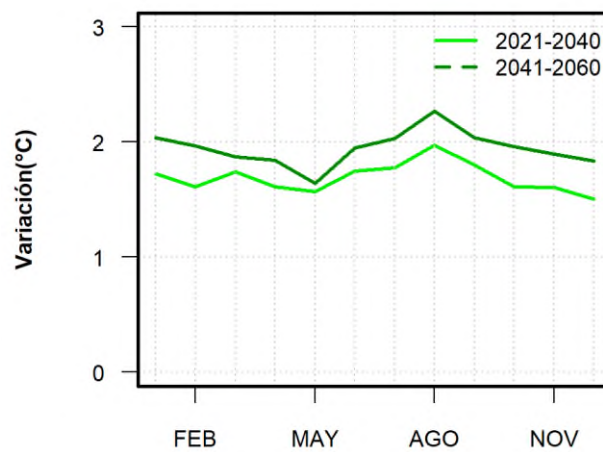


Figura 53. Variación de la temperatura para el modelo HadGem2-ES-REMO escenario RCP 2.6

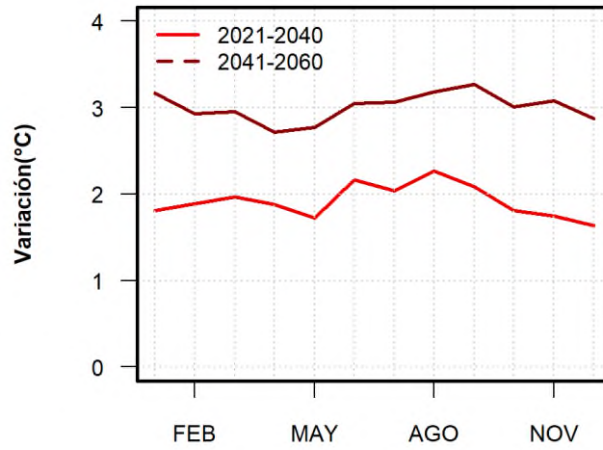


Figura 54. Variación de la temperatura para el modelo HadGem2-ES-REMO escenario RCP 8.5

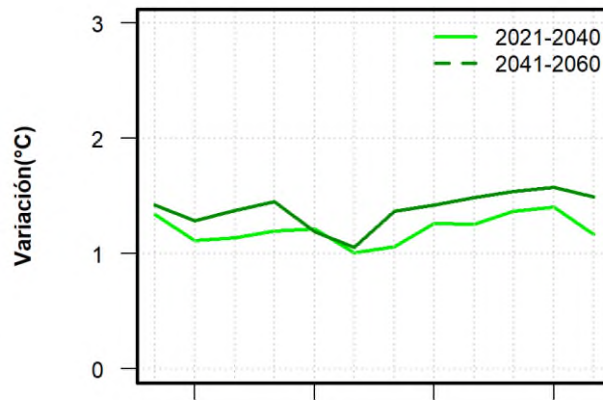


Figura 55. Variación de la temperatura para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 2.6

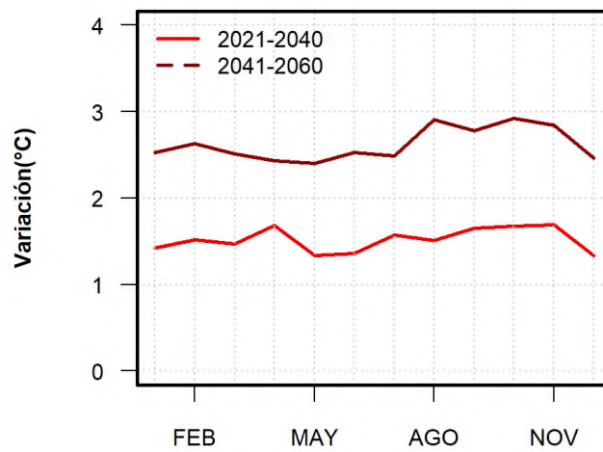


Figura 56. Variación de la temperatura para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 8.5

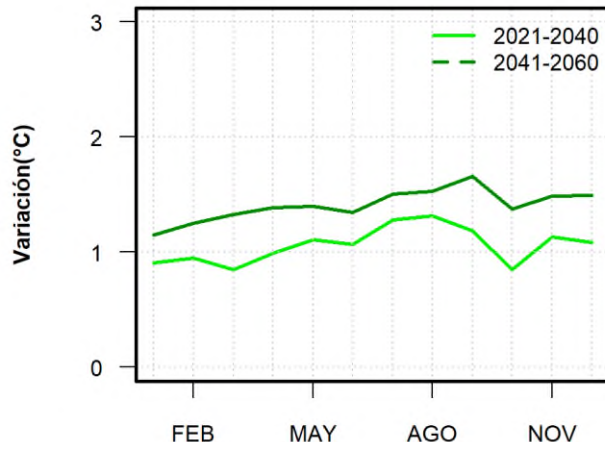


Figura 57. Variación de la temperatura para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 2.6

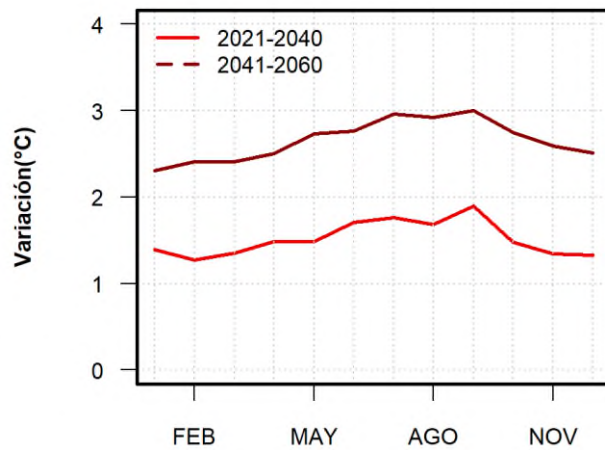


Figura 58. Variación de la temperatura para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 8.5

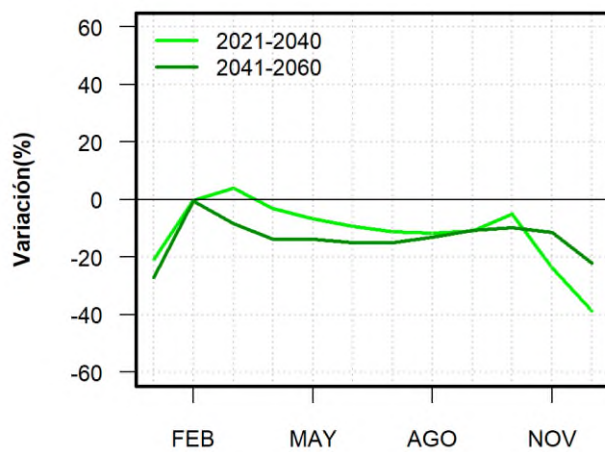


Figura 59. Variación del caudal para el modelo HadGem2-ES-REMO bajo el escenario RCP 2.6

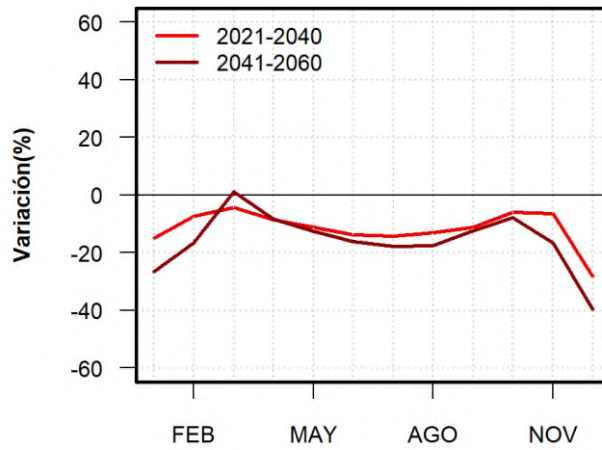


Figura 60. Variación del caudal para el modelo HadGem2-ES-REMO bajo el escenario RCP 8.5

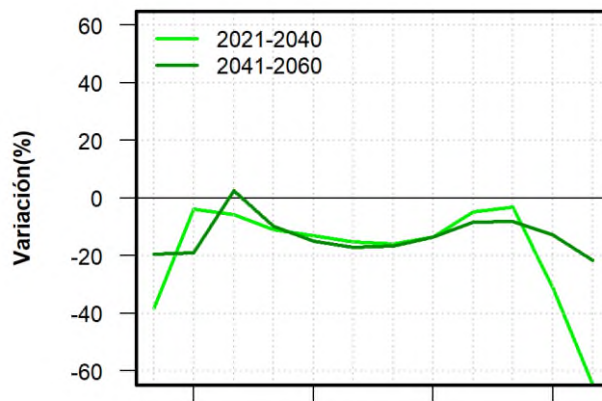


Figura 61. Variación del caudal para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 2.6

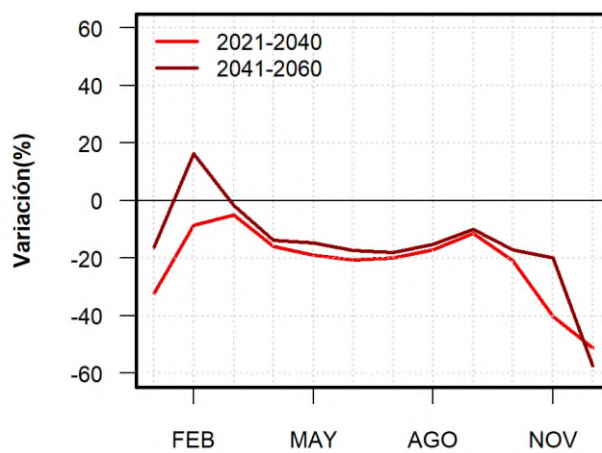


Figura 62. Variación del caudal para el modelo MPI-ESM-LR-REMO escenario RCP 8.5

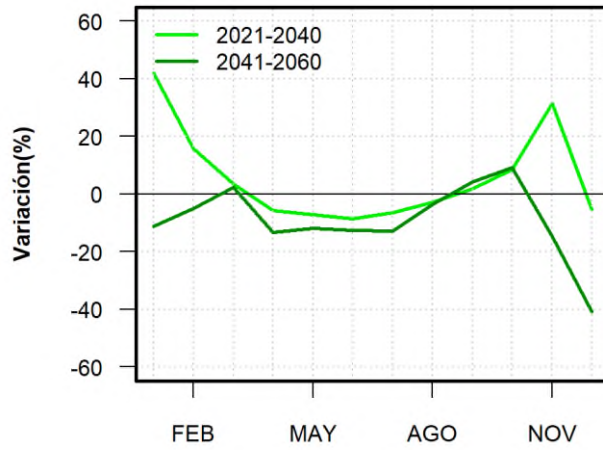


Figura 63. Variación del caudal para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 2.6

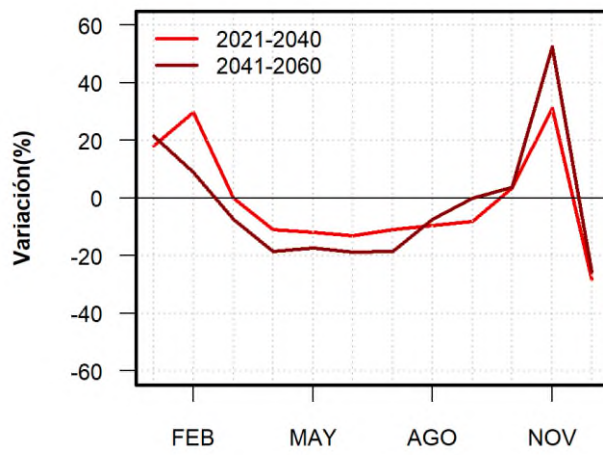


Figura 64. Variación del caudal para el modelo MPI-ESM-MR escenario RCP 8.5

Tabla 30. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	77.01	92.60	85.08	28.62	3.38	0.44	0.48	2.48	3.67	8.03	17.09	41.34	360.22
2021-2040 (mm)	95.50	95.11	86.06	27.37	2.84	0.14	0.92	3.09	4.42	9.87	18.88	41.68	385.88
2041-2060 (mm)	78.78	91.48	88.11	25.20	3.47	0.15	0.27	4.05	3.88	8.65	15.60	34.20	353.85
Variación (%) 2021-2040	24.00	2.72	1.15	-4.37	-15.87	-68.28	90.61	24.55	20.48	22.94	10.44	0.82	7.12
Variación (%) 2041-2060	2.29	-1.21	3.57	-11.94	2.77	-64.90	-43.14	63.31	5.74	7.72	-8.75	-17.27	-1.77

Tabla 31. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	77.01	92.60	85.08	28.62	3.38	0.44	0.48	2.48	3.67	8.03	17.09	41.34	360.22
2021-2040 (mm)	90.41	106.46	81.94	26.80	2.55	0.20	1.19	2.06	3.78	10.69	19.06	34.83	379.96
2041-2060 (mm)	89.43	99.13	82.66	26.57	3.21	0.38	0.49	3.97	3.73	8.99	22.69	36.26	377.51
Variación (%) 2021-2040	17.39	14.98	-3.69	-6.36	-24.61	-55.59	146.92	-16.76	2.88	33.16	11.49	-15.75	5.48
Variación (%) 2041-2060	16.12	7.05	-2.84	-7.15	-5.10	-14.48	1.06	60.25	1.73	11.99	32.73	-12.28	4.80

Tabla 32. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	77.34	94.61	86.71	29.16	3.12	0.42	0.53	2.36	4.34	8.67	18.85	43.22	369.32
2021-2040 (mm)	71.12	101.94	89.56	30.13	3.06	0.44	0.40	2.45	4.11	9.21	14.83	35.82	363.06
2041-2060 (mm)	65.89	100.01	84.50	28.80	3.23	0.44	0.46	2.39	4.00	8.65	17.54	40.67	356.57
Variación (%) 2021-2040	-8.04	7.75	3.29	3.31	-1.72	6.10	-24.25	4.04	-5.30	6.20	-21.34	-17.13	-1.69
Variación (%) 2041-2060	-14.81	5.72	-2.55	-1.27	3.56	4.82	-13.75	1.55	-7.66	-0.23	-6.97	-5.91	-3.45

Tabla 33. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	77.34	94.61	86.71	29.16	3.12	0.42	0.53	2.36	4.34	8.67	18.85	43.22	369.32
2021-2040 (mm)	70.71	93.68	87.75	30.50	3.01	0.55	0.57	2.54	4.19	9.79	17.72	38.24	359.23
2041-2060 (mm)	67.48	90.92	93.75	30.44	3.35	0.46	0.38	2.19	4.78	8.69	16.34	35.66	354.44
Variación (%) 2021-2040	-8.58	-0.98	1.20	4.57	-3.46	32.16	8.29	7.74	-3.43	12.82	-6.01	-11.54	-2.73
Variación (%) 2041-2060	-12.75	-3.90	8.12	4.39	7.41	9.54	-27.49	-7.07	10.31	0.20	-13.33	-17.51	-4.03

Tabla 34. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	73.46	95.39	83.49	29.10	3.14	0.43	0.52	2.20	3.94	9.75	16.45	44.28	362.15
2021-2040 (mm)	58.30	101.14	83.63	28.27	2.63	0.42	0.36	2.37	4.74	9.84	12.59	27.88	332.17
2041-2060 (mm)	65.85	88.21	90.31	27.20	2.26	0.34	0.43	2.26	4.46	10.32	17.13	36.65	345.41
Variación (%) 2021-2040	-20.64	6.02	0.17	-2.85	-16.32	-2.14	-30.61	7.68	20.11	0.99	-23.47	-37.04	-8.28
Variación (%) 2041-2060	-10.36	-7.53	8.16	-6.53	-28.04	-21.85	-17.30	2.66	13.15	5.84	4.16	-17.23	-4.62

Tabla 35. Comparación entre la precipitación del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	73.46	95.39	83.49	29.10	3.14	0.43	0.52	2.20	3.94	9.75	16.45	44.28	362.15
2021-2040 (mm)	64.41	96.24	84.54	25.92	2.18	0.34	0.37	2.04	4.59	7.53	13.56	27.89	329.62
2041-2060 (mm)	69.08	111.28	85.31	30.10	2.64	0.40	0.39	2.44	4.41	8.42	16.19	31.66	362.33
Variación (%) 2021-2040	-12.31	0.89	1.26	-10.91	-30.61	-20.53	-28.84	-7.45	16.27	-22.79	-17.53	-37.01	-8.98
Variación (%) 2041-2060	-5.95	16.65	2.18	3.46	-16.09	-7.17	-25.62	10.95	11.75	-13.62	-1.54	-28.51	0.05

Tabla 36. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.80	13.31	13.13	12.35	10.97	9.89	9.45	9.73	10.31	11.02	11.53	12.19	11.39
2021-2040 (°C)	13.71	14.25	13.98	13.34	12.07	10.96	10.73	11.04	11.49	11.87	12.67	13.28	12.45
2041-2060 (°C)	13.95	14.56	14.46	13.73	12.36	11.24	10.95	11.26	11.97	12.39	13.02	13.68	12.80
Variación (°C) 2021-2040	0.91	0.95	0.85	0.99	1.11	1.07	1.28	1.32	1.18	0.85	1.13	1.09	1.06
Variación (°C) 2041-2060	1.15	1.25	1.33	1.38	1.40	1.34	1.50	1.53	1.66	1.37	1.49	1.50	1.41

Tabla 37. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.80	13.31	13.13	12.35	10.97	9.89	9.45	9.73	10.31	11.02	11.53	12.19	11.39
2021-2040 (°C)	14.20	14.58	14.48	13.83	12.46	11.60	11.21	11.41	12.21	12.50	12.88	13.52	12.91
2041-2060 (°C)	15.11	15.71	15.54	14.85	13.70	12.66	12.41	12.65	13.31	13.77	14.12	14.70	14.04
Variación (°C) 2021-2040	1.39	1.28	1.35	1.48	1.49	1.71	1.76	1.69	1.90	1.48	1.35	1.33	1.52
Variación (°C) 2041-2060	2.31	2.41	2.41	2.50	2.73	2.76	2.96	2.92	3.00	2.75	2.59	2.51	2.65

Tabla 38. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.76	13.31	13.14	12.33	10.97	9.93	9.57	9.82	10.39	11.01	11.60	12.18	11.42
2021-2040 (°C)	14.48	14.92	14.88	13.94	12.54	11.68	11.35	11.79	12.19	12.62	13.20	13.68	13.11
2041-2060 (°C)	14.80	15.27	15.01	14.17	12.61	11.88	11.60	12.09	12.43	12.97	13.49	14.01	13.36
Variación (°C) 2021-2040	1.72	1.61	1.74	1.61	1.57	1.75	1.78	1.98	1.80	1.61	1.61	1.51	1.69
Variación (°C) 2041-2060	2.04	1.96	1.87	1.84	1.64	1.95	2.03	2.27	2.04	1.96	1.90	1.84	1.95

Tabla 39. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.76	13.31	13.14	12.33	10.97	9.93	9.57	9.82	10.39	11.01	11.60	12.18	11.42
2021-2040 (°C)	14.57	15.20	15.10	14.21	12.69	12.09	11.61	12.08	12.47	12.82	13.34	13.81	13.33
2041-2060 (°C)	15.93	16.24	16.09	15.04	13.75	12.98	12.63	13.00	13.66	14.02	14.68	15.05	14.42
Variación (°C) 2021-2040	1.81	1.89	1.97	1.88	1.72	2.16	2.04	2.26	2.09	1.81	1.75	1.64	1.92
Variación (°C) 2041-2060	3.17	2.93	2.96	2.71	2.78	3.05	3.06	3.18	3.27	3.01	3.08	2.87	3.01

Tabla 40. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.74	13.24	13.18	12.28	10.97	9.96	9.50	9.80	10.36	11.01	11.53	12.25	11.40
2021-2040 (°C)	14.08	14.35	14.32	13.48	12.18	10.97	10.56	11.07	11.61	12.37	12.94	13.41	12.61
2041-2060 (°C)	14.16	14.53	14.56	13.73	12.16	11.02	10.86	11.22	11.84	12.54	13.11	13.74	12.79
Variación (°C) 2021-2040	1.34	1.11	1.14	1.20	1.22	1.01	1.06	1.26	1.26	1.37	1.40	1.17	1.21
Variación (°C) 2041-2060	1.43	1.29	1.38	1.45	1.19	1.06	1.37	1.42	1.49	1.54	1.58	1.49	1.39

Tabla 41. Comparación entre la temperatura del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (°C)	12.74	13.24	13.18	12.28	10.97	9.96	9.50	9.80	10.36	11.01	11.53	12.25	11.40
2021-2040 (°C)	14.17	14.75	14.66	13.97	12.31	11.32	11.07	11.31	12.01	12.68	13.22	13.58	12.92
2041-2060 (°C)	15.27	15.87	15.70	14.71	13.37	12.49	11.98	12.71	13.14	13.92	14.38	14.71	14.02
Variación (°C) 2021-2040	1.43	1.51	1.47	1.68	1.34	1.36	1.57	1.51	1.65	1.67	1.69	1.34	1.52
Variación (°C) 2041-2060	2.53	2.63	2.51	2.43	2.40	2.53	2.49	2.90	2.78	2.92	2.85	2.46	2.62

Tabla 42. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	12.62	23.23	20.26	4.42	1.43	0.68	0.36	0.23	0.18	0.17	0.41	2.17	5.51
2021-2040 (mm)	17.89	26.91	20.95	4.17	1.33	0.62	0.33	0.22	0.18	0.19	0.54	2.06	6.28
2041-2060 (mm)	11.22	22.05	20.74	3.83	1.26	0.59	0.31	0.22	0.19	0.19	0.35	1.29	5.19
Variación (%) 2021-2040	41.80	15.84	3.42	-5.67	-7.16	-8.48	-6.52	-2.97	1.90	8.38	31.58	-5.26	13.97
Variación (%) 2041-2060	-11.09	-5.08	2.38	-13.36	-11.91	-12.67	-12.81	-3.57	4.32	9.15	-14.63	-40.85	-5.93

Tabla 43. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-MR- RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	12.62	23.23	20.26	4.42	1.43	0.68	0.36	0.23	0.18	0.17	0.41	2.17	5.51
2021-2040 (mm)	14.92	30.13	20.27	3.93	1.26	0.59	0.32	0.21	0.16	0.18	0.54	1.56	6.17
2041-2060 (mm)	15.32	25.30	18.78	3.60	1.18	0.55	0.29	0.21	0.18	0.18	0.63	1.62	5.65
Variación (%) 2021-2040	18.27	29.73	0.06	-11.01	-11.81	-13.07	-10.81	-9.52	-8.17	3.59	31.25	-28.12	11.98
Variación (%) 2041-2060	21.41	8.90	-7.29	-18.50	-17.28	-18.67	-18.57	-7.30	0.06	3.84	52.57	-25.54	2.55

Tabla 44. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	12.59	24.81	21.74	4.83	1.48	0.66	0.33	0.20	0.16	0.17	0.42	2.16	5.80
2021-2040 (mm)	9.97	24.73	22.62	4.68	1.38	0.60	0.29	0.18	0.14	0.16	0.32	1.33	5.53
2041-2060 (mm)	9.20	24.66	19.94	4.16	1.28	0.56	0.28	0.18	0.15	0.15	0.37	1.69	5.22
Variación (%) 2021-2040	-20.84	-0.31	4.07	-3.16	-6.63	-9.36	-11.18	-11.58	-10.90	-5.04	-23.60	-38.67	-4.53
Variación (%) 2041-2060	-26.92	-0.62	-8.24	-13.84	-13.80	-14.92	-14.95	-13.04	-10.65	-9.73	-11.33	-22.01	-9.97

Tabla 45. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario HadGem2-ES-REMO-RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	12.59	24.81	21.74	4.83	1.48	0.66	0.33	0.20	0.16	0.17	0.42	2.16	5.80
2021-2040 (mm)	10.70	22.99	20.82	4.42	1.32	0.57	0.28	0.18	0.14	0.16	0.39	1.55	5.29
2041-2060 (mm)	9.26	20.68	21.98	4.43	1.29	0.55	0.27	0.17	0.14	0.15	0.35	1.30	5.05
Variación (%) 2021-2040	-15.02	-7.32	-4.21	-8.54	-11.23	-13.73	-14.13	-12.97	-11.17	-5.86	-6.35	-28.15	-8.67
Variación (%) 2041-2060	-26.45	-16.63	1.11	-8.33	-12.66	-16.11	-17.84	-17.52	-12.44	-7.95	-16.53	-39.66	-12.89

Tabla 46. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 2.6 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	11.41	24.08	20.64	4.64	1.40	0.60	0.29	0.18	0.15	0.18	0.45	2.29	5.53
2021-2040 (mm)	7.05	23.18	19.47	4.13	1.21	0.51	0.25	0.16	0.14	0.17	0.31	0.81	4.78
2041-2060 (mm)	9.20	19.50	21.19	4.19	1.19	0.50	0.24	0.16	0.13	0.17	0.39	1.79	4.89
Variación (%) 2021-2040	-38.19	-3.74	-5.70	-10.97	-13.10	-15.23	-15.84	-13.43	-4.85	-3.12	-31.36	-64.77	-13.45
Variación (%) 2041-2060	-19.42	-19.04	2.67	-9.68	-14.88	-16.97	-16.58	-13.56	-8.43	-8.17	-12.76	-21.52	-11.55

Tabla 47. Comparación entre el caudal del periodo de referencia y el escenario MPI-ESM-LR-REMO - RCP 8.5 a nivel mensual

Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1981-2000 (mm)	11.41	24.08	20.64	4.64	1.40	0.60	0.29	0.18	0.15	0.18	0.45	2.29	5.53
2021-2040 (mm)	7.75	22.01	19.59	3.90	1.13	0.48	0.23	0.15	0.13	0.14	0.27	1.12	4.74
2041-2060 (mm)	9.58	28.01	20.30	4.00	1.19	0.49	0.24	0.15	0.13	0.15	0.36	0.97	5.46
Variación (%) 2021-2040	-32.11	-8.62	-5.09	-15.83	-18.90	-20.58	-19.84	-17.18	-11.28	-20.91	-40.25	-51.07	-14.18
Variación (%) 2041-2060	-16.10	16.31	-1.67	-13.74	-14.68	-17.37	-17.96	-15.24	-10.01	-17.08	-19.86	-57.37	-1.10

Anexo 3. Caudales medios mensuales naturalizados en la estación hidrométrica La Achirana

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
1964	1.25	7.72	13.32	4.68	0.47	0.000	0.00	0.00	0.00	0.03	0.85	0.87
1965	0.59	18.69	8.42	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1966	6.49	6.88	7.76	0.36	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
1967	12.22	68.72	59.01	7.11	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
1968	4.88	0.01	10.18	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1969	24.25	0.59	23.13	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.96
1970	41.67	11.97	8.71	6.63	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1971	4.17	14.02	28.42	8.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1972	21.71	27.26	44.83	11.23	0.47	0.19	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	6.22
1973	25.58	31.16	53.95	17.59	2.88	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
1974	22.68	33.10	23.40	5.01	0.53	0.10	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.45
1975	8.16	14.80	68.89	4.93	1.43	0.15	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00
1976	19.21	41.21	39.24	8.50	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1977	0.00	54.56	34.42	2.25	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.87	1.73
1978	4.30	11.06	5.91	3.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.74
1979	0.36	4.81	25.85	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
1980	4.18	3.40	13.12	1.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.05
1981	2.59	35.73	16.88	17.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.05
1982	7.18	54.98	16.35	10.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	2.14	0.72
1983	6.39	2.30	8.97	8.97	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76
1984	4.00	30.43	32.89	11.96	3.93	0.25	0.00	0.00	0.00	0.15	3.60	9.60
1985	1.31	34.88	16.62	11.38	0.32	0.20	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	2.01
1986	39.46	48.43	27.72	11.90	1.48	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	4.40
1987	21.20	15.97	3.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	15.97	26.17	8.42	7.33	8.51	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1989	16.81	40.19	36.01	15.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1990	7.57	0.29	11.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	16.07	10.07	19.39	7.13	3.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	0.38	0.34	0.60	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1993	5.78	14.03	15.64	11.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1994	20.36	72.25	0.00	13.55	3.73	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1995	11.40	6.94	38.00	9.89	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.64
1996	15.96	48.39	26.41	15.46	0.88	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	5.29
1997	10.83	19.27	13.52	7.18	2.73	0.10	0.10	0.10	0.17	0.10	0.16	3.17
1998	43.25	23.67	21.87	7.01	0.51	0.37	0.09	0.08	0.07	0.06	0.00	0.86
1999	5.57	55.00	36.40	16.14	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	21.28	30.15	34.42	7.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.08
2001	38.44	51.05	88.38	22.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	12.80	29.89	31.86	19.46	1.51	0.17	0.10	0.15	1.50	0.54	5.45	7.10
2003	11.69	17.79	27.37	11.78	0.31	0.64	0.16	0.13	0.08	1.85	6.80	10.76
2004	4.85	10.45	18.65	9.54	0.00	4.80	0.96	0.10	0.10	7.24	9.07	7.35
2005	5.12	6.89	16.35	10.65	0.00	3.87	0.20	0.10	0.10	1.04	6.06	8.26

Anexo 4. Descargas medias mensuales(m3/s) proyectadas al periodo 2021-2040/2041-2060 en la estación hidrométrica La Achirana

Modelo global del CMIP5 HadGem2-AO -RCP 2.6

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	20.84	9.85	32.06	4.92	1.48	0.66	0.32	0.20	0.13	0.10	0.34	3.02
2022	10.10	10.48	32.39	9.36	2.38	1.02	0.48	0.25	0.20	0.17	0.28	8.58
2023	34.40	26.06	24.28	7.67	2.10	0.94	0.46	0.26	0.19	0.15	0.17	5.42
2024	3.94	13.81	30.92	4.61	1.74	0.83	0.39	0.22	0.27	0.34	0.81	4.57
2025	12.95	20.90	17.71	4.63	1.58	0.69	0.34	0.21	0.35	0.62	5.71	24.93
2026	37.79	45.63	72.53	17.63	3.44	1.45	0.67	0.34	0.28	0.20	0.18	0.30
2027	17.18	47.73	22.05	6.06	1.93	0.88	0.43	0.27	0.20	0.21	0.37	0.46
2028	3.44	25.41	25.25	5.07	1.57	0.75	0.38	0.23	0.19	0.15	10.49	7.01
2029	31.31	43.56	18.76	6.01	1.82	0.82	0.40	0.24	0.16	0.18	0.32	1.66
2030	10.93	22.49	22.39	3.64	1.18	0.55	0.29	0.17	0.13	0.12	0.23	0.32
2031	1.83	8.07	35.50	4.10	1.39	0.65	0.32	0.22	0.19	0.36	2.60	2.43
2032	22.22	24.02	21.11	4.13	1.35	0.62	0.32	0.19	0.14	0.12	0.19	0.81
2033	2.90	6.75	3.15	2.95	1.35	0.55	0.26	0.17	0.21	0.16	0.23	0.62
2034	21.79	15.42	25.22	3.33	1.11	0.52	0.27	0.17	0.14	0.34	0.36	1.03
2035	25.45	49.02	10.60	2.96	1.22	0.58	0.29	0.18	0.24	0.21	0.26	10.68
2036	14.26	10.69	12.57	2.05	0.75	0.37	0.20	0.14	0.14	0.14	0.34	4.96
2037	25.12	56.63	52.29	16.44	3.60	1.49	0.68	0.36	0.27	0.18	0.54	1.66
2038	7.76	48.54	35.74	4.00	1.37	0.65	0.33	0.19	0.14	0.11	0.52	14.83
2039	6.14	14.41	22.99	8.06	2.19	0.91	0.42	0.23	0.15	0.11	2.71	13.68
2040	23.37	17.74	28.86	5.68	1.61	0.72	0.36	0.21	0.15	0.12	0.16	1.90
2041	10.80	10.80	10.34	2.65	0.91	0.42	0.22	0.15	0.16	0.24	1.59	1.68
2042	12.81	19.32	6.40	1.32	0.56	0.29	0.18	0.13	0.12	0.13	0.16	2.47
2043	12.77	37.50	15.13	3.63	1.23	0.55	0.29	0.19	0.16	0.13	0.90	4.70
2044	7.86	10.05	9.76	2.89	1.02	0.46	0.24	0.16	0.14	0.26	0.27	1.55
2045	7.87	32.43	8.81	1.57	0.60	0.31	0.18	0.13	0.11	0.13	0.15	0.27
2046	8.03	6.79	9.74	2.82	1.01	0.46	0.24	0.15	0.12	0.12	0.71	1.16
2047	8.44	20.27	23.48	4.35	1.35	0.61	0.30	0.18	0.15	0.14	1.00	2.49
2048	31.67	18.56	13.30	4.24	1.55	0.68	0.33	0.20	0.20	0.15	0.40	9.35
2049	5.67	1.79	5.76	1.33	0.49	0.25	0.16	0.12	0.11	0.10	0.30	2.31
2050	2.06	12.66	37.47	3.40	1.20	0.60	0.31	0.18	0.13	0.13	1.46	0.57
2051	10.63	13.52	11.92	4.26	1.30	0.56	0.28	0.19	0.16	0.19	0.19	2.16
2052	11.19	22.69	25.55	3.98	1.28	0.58	0.29	0.18	0.15	0.25	0.34	4.34
2053	7.00	18.35	11.43	3.15	1.11	0.50	0.28	0.18	0.15	0.15	0.20	4.30
2054	18.45	16.46	40.42	13.17	2.70	1.16	0.54	0.29	0.19	0.78	2.51	2.77
2055	22.04	23.95	36.45	16.06	3.99	1.54	0.68	0.35	0.23	0.16	0.15	3.32
2056	21.39	23.69	25.32	3.81	1.29	0.62	0.32	0.19	0.18	0.17	0.16	0.59
2057	17.35	3.64	12.10	2.30	0.76	0.36	0.20	0.14	0.16	0.15	0.30	1.22
2058	1.93	1.17	9.88	2.01	0.71	0.35	0.20	0.15	0.13	0.15	1.78	1.30
2059	3.92	8.76	17.63	2.65	1.12	0.55	0.27	0.17	0.18	0.15	1.30	0.54
2060	1.81	25.06	6.86	1.41	0.57	0.29	0.18	0.13	0.14	0.13	0.15	1.39

Modelo global del CMIP5 HadGem2-AO -RCP 8.5

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	39.01	32.47	49.22	17.79	4.05	1.6	0.71	0.34	0.37	0.29	0.37	3.98
2022	12.11	7.51	12.85	3.68	1.29	0.59	0.29	0.21	0.16	0.14	0.14	7.43
2023	30.42	36.29	17.07	7.37	1.95	0.86	0.41	0.23	0.16	0.12	0.2	1.82
2024	16.51	19.55	26.08	4.06	1.34	0.61	0.3	0.19	0.14	0.11	0.26	5.96
2025	13.88	35.63	26.09	11.87	2.88	1.15	0.51	0.28	0.18	0.17	0.35	4.23
2026	13.78	8.32	17.93	5.32	1.62	0.72	0.36	0.2	0.14	0.13	0.17	0.5
2027	8.24	32.93	37.22	5.98	1.63	0.72	0.35	0.2	0.13	0.1	0.12	0.25
2028	1.77	10.58	19.34	5.45	1.53	0.66	0.33	0.24	0.18	0.12	0.55	0.88
2029	16.37	53.89	24.91	5.82	1.77	0.81	0.39	0.22	0.15	0.12	0.3	5.78
2030	15.98	46.31	7.24	2.94	1.16	0.53	0.27	0.17	0.14	0.19	6.55	4.06
2031	19.96	39.49	16.29	4.58	1.47	0.66	0.34	0.21	0.18	0.18	0.26	3.94
2032	16.3	18.33	24.62	9.86	2.29	0.96	0.45	0.24	0.16	0.13	0.14	0.7
2033	13.44	9.19	25.46	5.37	1.71	0.76	0.37	0.22	0.18	0.17	0.2	0.82
2034	7.93	27.21	29.66	3.21	1.08	0.52	0.27	0.18	0.14	0.13	0.33	0.73
2035	17.03	11.14	12.13	4.02	1.27	0.55	0.27	0.18	0.17	0.21	0.45	2.25
2036	29.88	24.26	20.58	3.56	1.25	0.6	0.3	0.18	0.18	0.15	0.17	4.15
2037	7.68	51.71	30.64	5.94	1.78	0.8	0.39	0.22	0.15	0.12	0.22	8.82
2038	5.12	24.27	27.65	6.68	1.73	0.74	0.36	0.21	0.14	0.15	0.29	1.5
2039	6.85	19.16	5.79	3.61	1.67	0.69	0.35	0.22	0.19	0.2	0.23	1.0
2040	3.37	13.31	10.86	2.53	0.9	0.41	0.21	0.16	0.15	0.22	0.63	9.42
2041	22.42	21.95	26.05	9.29	2.1	0.89	0.42	0.22	0.15	0.12	1.2	0.71
2042	11.73	23.73	35.21	6.17	1.68	0.73	0.35	0.21	0.15	0.16	1.59	1.09
2043	28.84	23.58	48.15	7.12	1.99	0.94	0.48	0.26	0.19	0.2	0.28	1.33
2044	12.3	5.07	5.64	3.13	1.07	0.45	0.23	0.16	0.14	0.14	0.93	17.28
2045	34.9	15.31	35.09	15.23	2.76	1.15	0.53	0.27	0.24	0.18	0.77	1.68
2046	15.23	4.58	9.26	4.77	1.6	0.68	0.33	0.19	0.14	0.13	0.55	2.28
2047	3.66	11.2	14.39	7.08	1.7	0.68	0.31	0.2	0.18	0.21	1.66	44.34
2048	12.21	24.06	14.38	5.24	1.55	0.65	0.31	0.18	0.18	0.15	0.14	0.97
2049	5.38	9.11	8.32	3.02	1.02	0.43	0.22	0.16	0.14	0.12	0.73	5.23
2050	5.21	12.81	6.07	2.42	0.89	0.39	0.21	0.15	0.24	0.23	4.23	1.82
2051	20	28.07	16.71	4.08	1.46	0.63	0.3	0.18	0.15	0.2	4.05	6.95
2052	3.32	24.08	17.27	2.93	1.02	0.48	0.24	0.17	0.18	0.24	6.82	25.75
2053	17.25	67.56	43.39	6.38	1.98	0.86	0.4	0.23	0.17	0.15	0.92	11.77
2054	9.51	51.08	15.43	4.37	1.55	0.69	0.33	0.24	0.19	0.12	0.13	5.8
2055	3.33	17.38	17.02	6.51	1.87	0.75	0.34	0.19	0.2	0.17	0.49	3.93
2056	4.32	15.51	30.51	5.18	1.47	0.64	0.31	0.19	0.15	0.12	1.24	2.1
2057	12.09	37.28	17.77	7.05	1.74	0.73	0.35	0.21	0.16	0.12	0.18	0.99
2058	11.73	18.98	14.11	2.94	1	0.47	0.25	0.16	0.16	0.14	0.15	1.56
2059	7.95	9.69	16.26	5.54	1.54	0.62	0.29	0.17	0.2	0.19	0.43	5.07
2060	8.42	33.21	54.69	4.27	1.58	0.75	0.36	0.22	0.2	0.14	0.19	1.21

Modelo global del CMIP5 MPI-ESM-MR RCP 2.6

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	14.2	30.93	24.86	5.16	1.47	0.65	0.32	0.23	0.19	0.14	0.3	0.53
2022	14.44	22.15	17.41	4.5	1.49	0.69	0.36	0.22	0.15	0.22	0.36	0.98
2023	6.92	11.31	7.62	2.54	0.96	0.44	0.24	0.21	0.2	0.22	0.21	0.28
2024	10.32	17.05	10.25	2.41	0.94	0.46	0.25	0.17	0.14	0.31	0.74	2.11
2025	15.78	14.51	15.98	3.63	1.14	0.53	0.29	0.2	0.18	0.19	1.05	3.54
2026	27.63	36.32	29.47	3.7	1.31	0.64	0.33	0.23	0.23	0.16	0.21	0.71
2027	34.18	53.83	28.77	4.47	1.45	0.69	0.37	0.22	0.16	0.15	0.19	3.4
2028	16.55	32.77	14.16	3.91	1.32	0.61	0.32	0.2	0.16	0.15	0.39	3.73
2029	39.46	42.64	20.56	4	1.46	0.7	0.37	0.22	0.19	0.3	1.17	1.56
2030	11.92	15.52	12.55	2.22	0.79	0.39	0.23	0.16	0.12	0.14	2	3.28
2031	20.44	9.46	21.63	4.27	1.3	0.6	0.33	0.2	0.14	0.12	0.34	0.48
2032	13.15	21.1	29.03	3.95	1.3	0.62	0.33	0.2	0.15	0.13	0.12	0.45
2033	5.12	22.37	21.94	5.16	1.57	0.7	0.36	0.31	0.32	0.21	0.26	0.62
2034	10.21	23.04	17.56	4.1	1.26	0.58	0.3	0.19	0.14	0.11	0.24	0.59
2035	9.43	6.67	18.98	6.45	1.6	0.71	0.54	0.35	0.23	0.25	0.28	1.68
2036	23.12	36.71	28.16	3.34	1.12	0.56	0.3	0.25	0.23	0.24	0.93	8.19
2037	31.5	48.33	25.56	4.75	1.44	0.67	0.35	0.21	0.16	0.18	0.24	1.82
2038	10.96	36.7	24.4	5.03	1.51	0.7	0.36	0.22	0.16	0.13	1.14	3.37
2039	31.99	29.05	19.42	4.52	1.46	0.67	0.34	0.21	0.15	0.16	0.33	1.52
2040	10.45	27.69	30.71	5.29	1.67	0.76	0.4	0.24	0.2	0.21	0.27	2.36
2041	19.73	23.94	18.65	4.1	1.38	0.64	0.34	0.21	0.15	0.19	0.28	0.6
2042	7.03	13.55	9.71	2.03	0.79	0.39	0.22	0.15	0.12	0.19	0.36	0.91
2043	11.06	35.73	19.98	3.96	1.33	0.62	0.32	0.19	0.14	0.13	0.46	0.87
2044	7.5	25.55	28.77	4.74	1.45	0.67	0.34	0.22	0.17	0.13	0.23	1.75
2045	5.73	8.18	11.9	1.99	0.73	0.37	0.21	0.21	0.33	0.68	0.63	0.61
2046	6.88	29.61	34.09	5.26	1.44	0.66	0.34	0.2	0.17	0.23	1.25	6.67
2047	33.3	26.16	21.69	5.22	2.09	0.91	0.45	0.29	0.2	0.13	0.15	0.83
2048	14.09	15.78	9.17	1.87	0.89	0.47	0.25	0.17	0.14	0.12	0.28	0.27
2049	3.48	21.66	33.67	4.2	1.37	0.65	0.34	0.39	0.32	0.24	0.32	0.38
2050	3.1	26.06	26.98	4.14	1.37	0.65	0.34	0.28	0.24	0.22	0.47	0.25
2051	7.41	32.55	20.33	3.96	1.35	0.64	0.34	0.21	0.17	0.16	0.24	2.42
2052	13.04	9.88	17.91	2.47	0.86	0.43	0.24	0.17	0.15	0.12	0.2	0.41
2053	6.02	32.48	26.16	4.48	1.36	0.62	0.33	0.21	0.16	0.14	0.28	2.26
2054	16.23	10.85	16	4.51	1.35	0.62	0.33	0.21	0.17	0.18	0.43	1.04
2055	9.25	23.6	22.3	3.45	1.09	0.52	0.28	0.18	0.16	0.2	0.3	2.13
2056	14.08	21.68	19.75	4.53	1.4	0.65	0.34	0.27	0.23	0.16	0.2	0.43
2057	9.81	26.75	27.13	5.2	1.48	0.67	0.35	0.21	0.15	0.15	0.27	0.74
2058	14.22	25.52	29.73	5.52	1.56	0.71	0.37	0.22	0.15	0.13	0.34	2.29
2059	14.91	25.41	13.47	3.1	1.2	0.57	0.3	0.18	0.13	0.12	0.15	0.43
2060	7.46	6.08	7.42	1.88	0.7	0.34	0.2	0.25	0.24	0.15	0.15	0.41

Modelo global del CMIP5 MPI-ESM-MR RCP 8.5

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	7.58	19.72	19.38	4.37	1.32	0.59	0.28	0.15	0.1	0.18	0.6	1.38
2022	5.86	31.06	21.22	2.81	0.95	0.46	0.25	0.16	0.18	0.2	0.44	0.56
2023	8.26	6.92	5.81	1.71	0.71	0.35	0.21	0.14	0.12	0.14	0.67	3.65
2024	16.68	28.96	18.21	3.91	1.22	0.55	0.31	0.19	0.14	0.13	0.22	3.12
2025	23.05	11.22	11.3	3.46	1.15	0.53	0.28	0.2	0.16	0.14	0.32	2.31
2026	16.52	39.09	30.7	5.55	1.75	0.79	0.4	0.23	0.18	0.15	0.45	0.37
2027	15.82	29.78	19.91	3.82	1.24	0.58	0.31	0.19	0.15	0.24	0.23	0.18
2028	10.16	11.89	12.58	2.8	0.97	0.45	0.25	0.17	0.12	0.19	1.87	2.62
2029	16.56	34.16	23.34	3.23	1.04	0.5	0.27	0.17	0.13	0.14	1.4	0.67
2030	7.76	16.86	14.75	4.67	1.38	0.6	0.31	0.19	0.14	0.31	0.28	0.84
2031	11.84	38.21	21.82	4.04	1.38	0.65	0.34	0.21	0.15	0.12	0.11	1.21
2032	11.07	45.52	27.22	5.58	1.7	0.77	0.44	0.28	0.18	0.2	1.24	1.44
2033	15.44	29.51	12.95	3.22	1.1	0.51	0.28	0.2	0.18	0.13	0.15	0.48
2034	10.99	41.95	11.19	1.93	0.77	0.4	0.23	0.16	0.13	0.18	0.17	0.16
2035	8.92	35.12	25.94	4.21	1.41	0.66	0.34	0.2	0.15	0.22	0.35	1.46
2036	34.38	41.44	17.24	3.18	1.1	0.53	0.29	0.26	0.21	0.15	0.37	0.98
2037	24.44	31.17	20.66	4.1	1.35	0.63	0.33	0.25	0.31	0.24	0.72	6.39
2038	12.35	44.49	30.93	5.45	1.65	0.8	0.42	0.24	0.16	0.18	0.59	2.31
2039	8.5	31.81	27.92	5.49	1.6	0.72	0.37	0.22	0.16	0.19	0.3	0.44
2040	32.21	33.81	32.32	5.16	1.44	0.65	0.45	0.33	0.21	0.14	0.27	0.68
2041	26.95	20.46	13.2	2.61	1.01	0.49	0.26	0.18	0.14	0.12	0.2	1.18
2042	7.28	37.59	32.13	4.62	1.34	0.61	0.32	0.19	0.14	0.11	0.16	0.66
2043	11.33	29.61	15.66	2.86	1.05	0.58	0.32	0.19	0.14	0.14	0.37	0.87
2044	17.61	32.25	16.17	2.98	1.06	0.5	0.26	0.23	0.21	0.16	0.41	0.98
2045	9.47	32.68	34.14	5.59	1.61	0.72	0.37	0.21	0.14	0.12	0.13	0.76
2046	36.38	21.93	19.45	3.97	1.31	0.59	0.3	0.2	0.19	0.32	1.04	5.85
2047	34.73	19.14	12.26	3.13	1.15	0.53	0.28	0.18	0.15	0.11	0.21	1.05
2048	12.47	16.19	21.97	4.14	1.29	0.6	0.31	0.21	0.17	0.15	0.63	2.86
2049	16.76	20.98	18.37	3.51	1.2	0.56	0.29	0.18	0.13	0.17	1.25	1.33
2050	6.2	20.37	11.99	3.26	1.14	0.52	0.27	0.18	0.14	0.13	0.7	1.54
2051	38.34	42.27	17.37	4.36	1.46	0.67	0.34	0.21	0.22	0.44	1.28	2.6
2052	5.28	14.69	17.59	3.34	1.09	0.52	0.28	0.24	0.23	0.15	0.19	0.2
2053	12.37	27.86	15.62	4.61	1.44	0.62	0.31	0.19	0.14	0.13	2.68	3.96
2054	23.81	25.16	23.19	2.75	0.9	0.44	0.25	0.18	0.17	0.16	0.37	1.49
2055	4.14	27.03	18.46	4.12	1.29	0.58	0.3	0.18	0.14	0.31	0.39	2.06
2056	12.41	42.4	17.7	2.34	0.82	0.41	0.23	0.52	0.51	0.31	0.95	2.01
2057	9.04	25.33	18.78	4.01	1.23	0.55	0.29	0.19	0.14	0.14	0.34	0.23
2058	8.28	8.96	21.17	3.4	1.17	0.55	0.28	0.17	0.13	0.1	0.35	1.55
2059	12.13	20.68	11.13	2.28	0.85	0.4	0.26	0.22	0.17	0.15	0.26	0.31
2060	1.34	20.36	19.26	4.19	1.23	0.54	0.28	0.18	0.14	0.16	0.62	0.88

Modelos regionalizados de CORDEX HadGem2-ES - REMO RCP 2.6

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	13.82	24.12	28.66	5.61	1.56	0.67	0.31	0.18	0.13	0.1	0.15	1.1
2022	19.63	23.5	27.22	4.42	1.37	0.62	0.31	0.18	0.15	0.24	0.62	3.37
2023	10.16	24.91	32.25	5.55	1.44	0.61	0.3	0.18	0.13	0.12	0.21	0.52
2024	7.54	25.63	20.85	4.75	1.4	0.59	0.29	0.2	0.17	0.17	0.38	1.44
2025	14.29	29.81	24.92	5.91	1.66	0.72	0.34	0.2	0.15	0.11	0.24	1.3
2026	12.47	23.37	12.69	2.1	0.74	0.35	0.2	0.14	0.13	0.14	0.18	0.55
2027	5.08	27.17	25.71	4.82	1.39	0.6	0.29	0.18	0.16	0.16	0.29	2.21
2028	7.42	23.06	24.9	5.19	1.5	0.63	0.3	0.19	0.14	0.23	0.7	1.28
2029	5.65	27.28	17.02	4.08	1.25	0.54	0.27	0.16	0.14	0.12	0.31	1.19
2030	4.85	18.82	16.43	3.65	1.11	0.47	0.24	0.16	0.12	0.15	0.32	1.09
2031	7.82	29.03	18.13	4.62	1.41	0.61	0.29	0.18	0.14	0.12	0.29	1.82
2032	11.09	25.81	29.74	5.14	1.59	0.69	0.33	0.2	0.15	0.19	0.33	1.75
2033	8	18.64	21.57	5.54	1.49	0.62	0.3	0.18	0.17	0.26	0.37	0.55
2034	10.87	13.65	6.22	1.88	0.78	0.36	0.19	0.14	0.14	0.12	0.2	0.39
2035	8.72	26.87	25.03	4.43	1.43	0.64	0.31	0.19	0.14	0.14	0.2	0.31
2036	12.32	24.4	14.27	4.21	1.36	0.58	0.28	0.18	0.15	0.11	0.34	1.06
2037	8.24	23.56	26.18	4.62	1.39	0.61	0.3	0.18	0.14	0.2	0.47	4.99
2038	11.74	22.29	18.32	3.85	1.06	0.44	0.22	0.14	0.11	0.13	0.19	0.38
2039	8.05	34.93	30.21	6.78	1.94	0.83	0.4	0.24	0.19	0.19	0.36	0.95
2040	11.58	27.78	32.11	6.46	1.8	0.76	0.36	0.2	0.17	0.16	0.2	0.25
2041	6.27	30.56	24.33	3.92	1.27	0.59	0.3	0.19	0.15	0.14	0.4	1.14
2042	4.99	22.27	28.66	6.21	1.78	0.76	0.35	0.2	0.15	0.19	0.26	0.8
2043	9.17	26.8	17.87	3.33	1.03	0.46	0.24	0.16	0.14	0.13	0.54	2.7
2044	14.21	20.46	19.67	4.51	1.41	0.62	0.3	0.19	0.14	0.15	0.35	0.7
2045	2.94	5.07	9.63	2.38	0.77	0.35	0.19	0.14	0.13	0.15	0.32	0.6
2046	10.42	28.73	18.83	4.93	1.45	0.61	0.3	0.18	0.14	0.12	0.31	0.81
2047	4.63	23.06	22.06	4.47	1.42	0.62	0.3	0.18	0.13	0.21	0.47	1.83
2048	10.13	32.89	19.01	4.58	1.36	0.58	0.28	0.17	0.13	0.16	0.42	2.08
2049	9.89	29.35	22.04	3.5	1.14	0.53	0.27	0.18	0.16	0.16	0.57	1.55
2050	6.44	16.1	15.58	3.87	1.19	0.5	0.25	0.16	0.14	0.14	0.48	6.27
2051	21.72	32.44	18.39	4.38	1.51	0.67	0.33	0.22	0.19	0.19	0.99	5.29
2052	22.07	57.18	35.59	6.89	1.92	0.82	0.39	0.24	0.18	0.22	0.39	0.87
2053	4.49	24.38	31.75	7.51	1.85	0.76	0.36	0.22	0.17	0.14	0.5	1.5
2054	4.9	21.62	21.42	3.74	1.2	0.54	0.27	0.16	0.13	0.11	0.2	1.13
2055	8.33	26.43	10.8	2.11	0.8	0.39	0.21	0.15	0.14	0.13	0.25	0.92
2056	6.33	15.88	14.69	3.11	0.98	0.43	0.22	0.14	0.11	0.11	0.12	1.61
2057	11.02	23.58	16.11	2.87	0.99	0.45	0.23	0.15	0.12	0.12	0.19	1.34
2058	9.26	16.01	10.19	2.91	0.99	0.45	0.24	0.16	0.16	0.13	0.25	1.08
2059	10.76	11	15.82	2.74	0.93	0.43	0.22	0.15	0.14	0.16	0.18	0.99
2060	6.09	29.34	26.48	5.33	1.56	0.65	0.31	0.19	0.15	0.14	0.19	0.52

Modelos regionalizados de CORDEX HadGem2-ES - REMO RCP 8.5

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	18.11	18.39	26.52	6.22	1.75	0.73	0.32	0.17	0.11	0.14	0.24	0.6
2022	8.47	16.54	12.92	3.44	1.19	0.53	0.27	0.17	0.14	0.17	0.41	4.45
2023	11.18	34.21	35.36	6.29	1.77	0.76	0.37	0.22	0.15	0.13	0.45	2.18
2024	16.61	34.17	26.17	6.58	1.66	0.68	0.32	0.21	0.19	0.21	0.62	0.85
2025	6.32	17.92	15.19	3.67	1.16	0.5	0.24	0.15	0.13	0.15	0.33	1.04
2026	10.18	38.89	22.76	4.99	1.54	0.68	0.33	0.2	0.16	0.15	0.37	3
2027	21.15	10.91	16.27	4.62	1.26	0.51	0.24	0.15	0.13	0.16	0.35	0.82
2028	4.01	18.63	17.56	3.18	1.08	0.51	0.26	0.17	0.14	0.12	0.19	0.91
2029	7.77	29.47	26.47	3.77	1.11	0.49	0.25	0.16	0.12	0.13	0.42	0.92
2030	2.08	15.74	18.67	3.8	1.08	0.46	0.25	0.16	0.12	0.19	0.32	0.7
2031	8.35	31.15	26.31	5.05	1.49	0.68	0.35	0.23	0.2	0.19	0.28	0.67
2032	7.72	13.92	13.78	3.8	1.12	0.48	0.25	0.17	0.14	0.17	0.77	2.64
2033	20.42	36.07	26.54	5.26	1.56	0.69	0.34	0.21	0.16	0.22	0.59	3.36
2034	16.17	27.34	22.68	3.73	1.17	0.51	0.26	0.17	0.16	0.13	0.41	1.03
2035	8.24	16.2	22.7	3.71	1.18	0.53	0.27	0.17	0.14	0.13	0.42	0.97
2036	7.82	6.26	9.96	3.18	1.08	0.48	0.25	0.17	0.15	0.14	0.15	0.34
2037	5.85	20.54	17.9	4.97	1.35	0.55	0.27	0.16	0.13	0.14	0.19	0.83
2038	12.64	26.31	15.57	3.44	1.08	0.46	0.24	0.16	0.13	0.15	0.49	1.41
2039	11.31	25.85	28.74	4.7	1.4	0.62	0.3	0.19	0.16	0.16	0.34	2.3
2040	9.64	21.34	14.33	4.01	1.27	0.53	0.25	0.15	0.12	0.14	0.46	2.03
2041	15.09	29.04	28.04	4.18	1.24	0.54	0.26	0.16	0.13	0.18	0.33	1.21
2042	5.42	8.53	16.98	2.95	0.93	0.41	0.21	0.14	0.12	0.11	0.27	0.3
2043	7.85	21.05	18.11	4.06	1.28	0.56	0.28	0.17	0.13	0.14	0.4	0.96
2044	8.88	10.37	11.36	3.1	1.07	0.46	0.24	0.16	0.13	0.12	0.18	0.53
2045	5.81	17.93	24.19	4.53	1.3	0.54	0.25	0.15	0.12	0.13	0.36	0.65
2046	8.04	22.59	22.11	6.09	1.69	0.69	0.32	0.18	0.16	0.15	0.35	0.83
2047	2.68	8.2	9.82	3.11	1.02	0.44	0.22	0.14	0.12	0.11	0.26	2.17
2048	19.07	34.14	36.09	7.01	1.84	0.79	0.37	0.2	0.14	0.11	0.18	0.22
2049	3.94	22.79	20.62	4.97	1.52	0.65	0.3	0.18	0.14	0.15	0.23	1.64
2050	8.07	24.65	21.39	4.02	1.29	0.56	0.27	0.17	0.14	0.13	0.21	0.7
2051	2.89	13.1	16.71	4.07	1.16	0.48	0.24	0.16	0.16	0.19	0.28	0.63
2052	4.89	16.58	18.76	4.88	1.35	0.57	0.28	0.19	0.18	0.17	0.18	0.76
2053	4.33	17.85	30.47	6.27	1.57	0.64	0.3	0.18	0.14	0.12	0.3	4.79
2054	14.04	32.16	30.08	4.38	1.4	0.63	0.31	0.18	0.13	0.15	0.22	0.71
2055	12.63	13.13	22.05	5.2	1.42	0.59	0.29	0.19	0.15	0.13	0.46	1.46
2056	6.91	13.77	17.18	2.08	0.67	0.32	0.18	0.12	0.11	0.13	0.23	0.8
2057	4.2	17.2	17.39	3.81	1.13	0.49	0.24	0.17	0.16	0.18	0.32	0.72
2058	4.76	23.83	19.05	3.22	1.05	0.47	0.24	0.16	0.14	0.14	0.18	2.8
2059	32.12	42.34	39.1	6.59	1.69	0.7	0.33	0.2	0.15	0.27	1.07	2.42
2060	13.62	24.39	20.04	4.09	1.26	0.53	0.25	0.16	0.2	0.26	0.91	1.8

Modelos regionalizados de CORDEX MPI-ESM-LR – REMO RCP 2.6

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	13.21	36.52	20.86	5.12	1.42	0.58	0.26	0.15	0.11	0.11	0.29	0.53
2022	8.46	54.41	27.02	3.38	1.11	0.51	0.26	0.17	0.16	0.15	0.18	0.24
2023	14.2	48.75	23.15	4.32	1.33	0.56	0.26	0.16	0.13	0.33	0.52	2.5
2024	13.67	36.96	21.66	4.03	1.22	0.52	0.26	0.16	0.14	0.14	0.57	0.96
2025	2.29	21.8	26.05	5.09	1.64	0.68	0.31	0.2	0.26	0.23	0.86	1.69
2026	17.41	15.24	21.54	6.16	1.53	0.6	0.28	0.16	0.13	0.11	0.14	0.55
2027	9.85	19.65	20.7	5.5	1.54	0.63	0.3	0.17	0.15	0.14	0.26	2.45
2028	19.93	45.71	20.18	3.62	1.11	0.49	0.25	0.16	0.13	0.11	0.14	0.15
2029	2.09	23.52	18.02	5.08	1.42	0.62	0.3	0.19	0.15	0.11	0.14	0.62
2030	4.71	12.85	19.41	3.73	1.07	0.44	0.22	0.15	0.13	0.27	0.2	2.27
2031	5.78	15	22.52	4.94	1.34	0.53	0.25	0.15	0.12	0.34	0.94	0.77
2032	2.49	19	26.33	3.89	1.09	0.45	0.22	0.17	0.24	0.32	0.37	0.39
2033	2.88	13.19	9.92	3.17	1.16	0.49	0.23	0.14	0.11	0.1	0.1	0.17
2034	1.73	22.77	18.18	4.72	1.29	0.53	0.25	0.15	0.12	0.15	0.17	0.35
2035	2.57	14.33	19.28	4.19	1.21	0.5	0.25	0.16	0.13	0.24	0.38	0.46
2036	10.03	13.04	11.83	2.59	0.86	0.37	0.19	0.13	0.1	0.09	0.12	0.34
2037	2.2	7.27	17.05	3.63	1.02	0.43	0.22	0.15	0.13	0.18	0.23	0.79
2038	4.74	27.82	21.31	4.14	1.29	0.55	0.26	0.16	0.14	0.16	0.2	0.56
2039	2.14	11.47	15.32	2.57	0.76	0.33	0.18	0.12	0.11	0.1	0.1	0.15
2040	0.71	4.35	9.04	2.71	0.83	0.34	0.18	0.12	0.1	0.12	0.19	0.18
2041	2.43	10.52	11.53	3.41	0.92	0.37	0.19	0.14	0.13	0.15	0.26	0.48
2042	5.78	10.14	13.71	3.56	1.12	0.47	0.23	0.14	0.12	0.18	0.89	1.15
2043	15.39	12.01	16.7	3.17	0.95	0.4	0.2	0.14	0.13	0.13	0.33	0.68
2044	7.89	9.93	15.31	2.98	0.98	0.41	0.2	0.14	0.14	0.22	0.27	0.94
2045	18.19	24.55	31.84	5.77	1.45	0.61	0.31	0.18	0.13	0.26	0.27	5.44
2046	18.63	21.98	27.57	7.31	1.75	0.68	0.32	0.18	0.13	0.12	0.12	0.12
2047	3.25	20.82	13.38	2.11	0.73	0.34	0.18	0.12	0.11	0.13	0.64	3.01
2048	10.35	27.89	40.11	6.23	1.58	0.65	0.31	0.19	0.2	0.16	0.76	9.94
2049	5.19	33.16	25.47	3.47	1.08	0.48	0.24	0.16	0.13	0.12	0.29	0.44
2050	3.58	15.87	10.55	1.8	0.67	0.33	0.18	0.13	0.12	0.29	0.98	1.97
2051	5.91	13.6	17.42	4.36	1.12	0.45	0.22	0.15	0.13	0.13	0.2	0.48
2052	22.86	40.73	25.18	4.08	1.18	0.51	0.25	0.15	0.13	0.13	0.36	4.64
2053	19.34	35.64	13	3.08	1.1	0.49	0.25	0.16	0.12	0.18	0.28	0.31
2054	1.76	22.67	29.67	6.06	1.49	0.6	0.29	0.19	0.14	0.22	0.74	1.13
2055	16.73	10.77	28.08	4.75	1.37	0.57	0.26	0.16	0.14	0.15	0.14	0.74
2056	3.75	13.61	18.61	4.16	1.17	0.47	0.23	0.15	0.15	0.24	0.36	1.07
2057	12.1	14.72	30.5	4.26	1.2	0.52	0.25	0.15	0.12	0.11	0.27	0.62
2058	1.96	12.85	11.47	3.57	1.15	0.48	0.23	0.17	0.14	0.1	0.15	1.55
2059	5.4	12.42	25.16	5.49	1.51	0.6	0.28	0.17	0.13	0.11	0.29	0.86
2060	3.42	26.05	18.63	4.18	1.25	0.52	0.25	0.16	0.14	0.19	0.18	0.29

Modelos regionalizados de CORDEX MPI-ESM-LR – REMO RCP 2.6

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
2021	12.32	19.91	14.75	3.74	1.04	0.4	0.18	0.1	0.07	0.07	0.2	0.89
2022	3.36	14.76	19.59	3.28	1.01	0.46	0.23	0.16	0.13	0.12	0.3	10.13
2023	31.6	30.33	21.16	5.12	1.5	0.63	0.3	0.18	0.13	0.11	0.15	0.85
2024	3.7	30.74	29.05	4.78	1.31	0.54	0.27	0.17	0.14	0.12	0.61	0.81
2025	11.86	19.78	15.74	4.02	1.2	0.49	0.24	0.15	0.14	0.15	0.19	0.25
2026	10.94	27.99	30.12	4.58	1.3	0.54	0.26	0.15	0.11	0.09	0.13	0.26
2027	4.28	17.88	9.64	2.78	0.93	0.39	0.2	0.14	0.15	0.22	0.43	2.42
2028	14.89	31.12	18.27	4.49	1.33	0.56	0.27	0.16	0.15	0.33	0.23	0.57
2029	6.69	37.44	29.57	5.55	1.56	0.66	0.31	0.2	0.17	0.16	0.12	0.13
2030	4.77	15.82	28.34	7.57	1.92	0.76	0.35	0.19	0.14	0.18	0.3	0.63
2031	3.98	14.61	16.22	4.27	1.2	0.49	0.24	0.16	0.17	0.2	0.22	0.28
2032	6.44	24.74	22.46	2.9	0.88	0.39	0.2	0.14	0.12	0.13	0.15	0.3
2033	8.29	18.49	11.03	2.2	0.8	0.36	0.19	0.13	0.11	0.1	0.16	0.26
2034	2.03	16.36	14.05	3.52	1.03	0.41	0.2	0.13	0.12	0.14	0.89	0.48
2035	12.17	40.2	18.66	2.29	0.75	0.36	0.2	0.14	0.14	0.11	0.12	0.28
2036	5.49	16.51	17.93	3.79	1.06	0.45	0.23	0.14	0.12	0.13	0.17	0.42
2037	2.45	5.26	14.45	2.65	0.8	0.35	0.18	0.12	0.1	0.09	0.11	0.14
2038	1.22	17.48	18.84	4.48	1.16	0.45	0.22	0.14	0.13	0.11	0.17	0.24
2039	7.14	26.61	28.88	3.78	1.1	0.48	0.24	0.16	0.14	0.2	0.38	0.19
2040	1.34	14.1	13.08	2.29	0.77	0.35	0.19	0.13	0.11	0.09	0.27	2.83
2041	8.67	13.07	20.55	3.73	1.16	0.5	0.25	0.17	0.14	0.13	0.26	0.96
2042	3.77	30.77	11.23	3.49	1.13	0.46	0.23	0.14	0.12	0.16	1.67	1.09
2043	4.58	14.31	16.89	4.6	1.27	0.49	0.23	0.14	0.11	0.47	0.91	3.91
2044	28.33	52.07	19.21	2.57	0.91	0.43	0.23	0.16	0.14	0.11	0.11	0.29
2045	1.56	18.5	21.94	5.65	1.5	0.6	0.29	0.18	0.15	0.12	0.19	0.53
2046	8.35	33.51	29.77	7.88	1.88	0.73	0.33	0.18	0.14	0.14	0.13	0.34
2047	6.22	12.55	22.83	4.18	1.24	0.52	0.24	0.15	0.13	0.14	0.2	0.66
2048	29.75	62.85	40.42	4.81	1.49	0.66	0.32	0.21	0.19	0.18	0.45	1.2
2049	6.22	20.04	14.26	3.92	1.17	0.49	0.23	0.14	0.15	0.13	0.17	1.57
2050	12.68	35.22	13.5	3.36	1.16	0.49	0.24	0.15	0.12	0.11	0.15	0.36
2051	1.77	2.49	12.24	2.52	0.73	0.31	0.17	0.13	0.11	0.11	0.18	0.42
2052	9.43	16.26	10.82	2.17	0.78	0.35	0.18	0.13	0.13	0.11	0.3	2.85
2053	11.62	30.27	25.01	3.9	1.3	0.56	0.26	0.16	0.12	0.11	0.62	1.27
2054	7.14	29.22	15.27	3.32	1.16	0.48	0.23	0.14	0.12	0.14	0.53	1.07
2055	14.45	35.54	24.06	4.05	1.12	0.46	0.22	0.14	0.11	0.16	0.21	0.17
2056	2.19	38.83	18.89	3.2	0.98	0.41	0.2	0.14	0.14	0.15	0.34	0.42
2057	3.05	22.97	21.84	3.56	1.09	0.48	0.23	0.15	0.14	0.13	0.22	0.57
2058	2.37	24.93	24.57	5.21	1.46	0.59	0.28	0.17	0.15	0.15	0.12	0.25
2059	4.37	27.99	32.5	4.39	1.14	0.46	0.22	0.14	0.11	0.1	0.18	0.47
2060	24.99	38.78	10.16	3.51	1.14	0.45	0.22	0.15	0.13	0.12	0.2	1.09

Anexo 5. Simulación en el modelo hidrológico WEAP

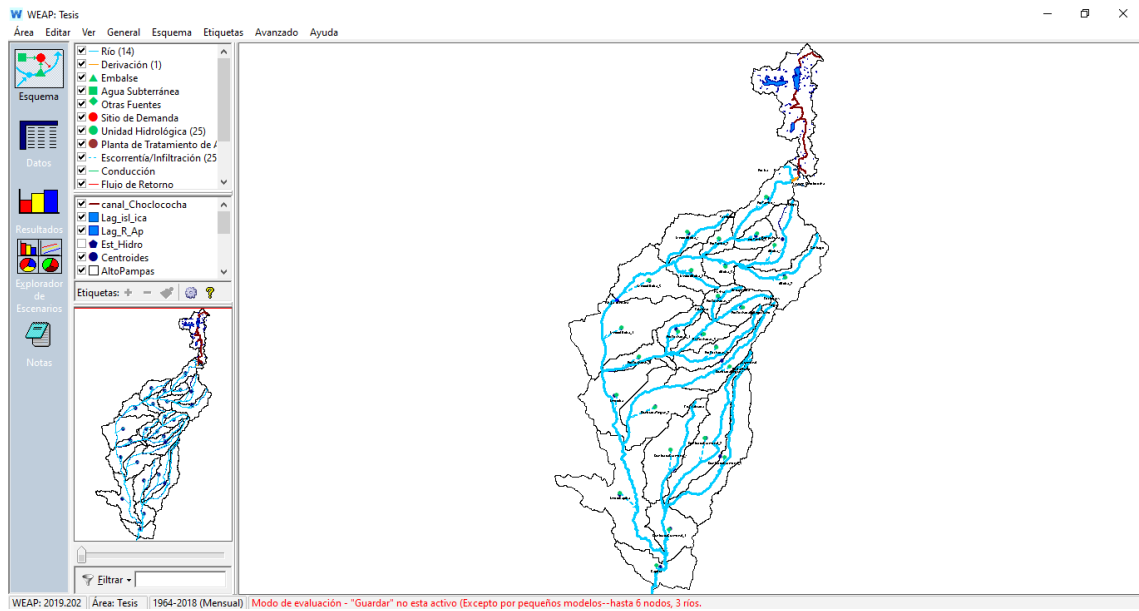


Figura 65. Esquema planteado considerando los aportes del Sistema Choclococha y de las subcuencas ubicadas en la parte media y baja de la cuenca para una investigación futura

Anexo 6. Fotografías



Figura 66. La Laguna de Choclococha, localizada en Huancavelica a 4,605 m.s.n.m.



Figura 67. Canal de riego La Achirana



Figura 68. Nuevo sistema de riego La Achirana - Nueva Bocatoma