

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DEL
AMBIENTE**



TESIS

**Predicción de Sequías Mediante Modelos de Cópulas
y Datos Hidrometeorológicos en la Región Sur del
Perú, 2024**

PRESENTADA POR:

Virgilio Arriaga Gómez

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN SOSTENIBLE DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Huancayo – Perú

2025

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes Internacionales

En el estudio de Terzi y Öñöz (2025a), cuya investigación se titula *“Advanced drought analysis using a novel copula-based multivariate index: a case study of the Ceyhan River Basin”*, se planteó como objetivo desarrollar una metodología innovadora para calcular el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía (MSDI) utilizando funciones cópula ajustadas a la estacionalidad de los datos, y evaluar su eficacia comparativa frente a índices univariados como el SPI y SSFI en la cuenca del río Ceyhan (CRB), en Turquía.

La metodología consistió en:

- Se analizaron datos hidrometeorológicos históricos de cuatro estaciones meteorológicas e hidrológicas emparejadas por proximidad geográfica.
- El rango temporal abarcó desde 1989 hasta 2011.
- Las variables consideradas fueron la precipitación y el caudal fluvial; aunque no incluyeron directamente temperatura, humedad relativa o evapotranspiración, la metodología es extensible a estos parámetros.
- Se aplicaron pruebas de homogeneidad (SNHT, Buishand Range y Q test) y técnicas de imputación de datos mediante redes neuronales (LSTM, CNN, FNN) con $R^2 > 0,80$.
- Los análisis estadísticos incluyeron ajuste de distribuciones marginales (Gamma y Lognormal), pruebas de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov) y estimación de cópulas bivariadas (Clayton, Frank, Gumbel, Gaussian, Student-t).
- Para seleccionar la cópula más adecuada se emplearon los criterios AIC y BIC en cada subgrupo mensual de datos, considerando la estacionalidad.
- Se utilizaron tanto MSDI paramétrico como no paramétrico (MSDIe), además del SPI y SSFI.

- La validación incluyó correlaciones cruzadas entre índices, comparación temporal y clasificación de eventos de sequía.

Los principales resultados obtenidos fueron que el MSDI mejoró la detección de eventos de sequía en comparación con los índices univariados, identificando eventos concurrentes meteorológicos e hidrológicos que estos últimos no detectaron. Se observaron correlaciones superiores al 99 % entre MSDI y MSDIe, aunque el MSDI ofreció una representación más precisa de la severidad de las sequías, especialmente en los extremos de la distribución.

Se concluyó que el uso de múltiples cópulas seleccionadas según la estacionalidad de los datos mejora sustancialmente la precisión del MSDI. Esta aproximación permite una evaluación más integrada de las sequías, con ventajas claras para la planificación hídrica, especialmente en regiones con alta variabilidad estacional como la cuenca del río Ceyhan. Este enfoque es directamente comparable y adaptable a regiones como el sur del Perú, donde se dispone de datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y evapotranspiración, lo que lo convierte en una base metodológica relevante para el modelado de sequías multivariadas en el presente estudio doctoral.

En el estudio de Esit y Yuce (2023), cuya investigación se titula *“Copula-based bivariate drought severity and duration frequency analysis considering spatial temporal variability in the Ceyhan Basin, Turkey”*, se planteó como objetivo principal modelar conjuntamente la duración y severidad de eventos de sequía utilizando cópulas bivariadas, incorporando la variabilidad espacio-temporal y elevacional de la cuenca del río Ceyhan en Turquía.

La metodología consistió en:

- Se analizaron datos de 24 estaciones meteorológicas distribuidas en diferentes niveles de elevación (alta, media y baja) en la cuenca.
- El rango temporal de los datos abarcó desde 1963 hasta 2016, variando ligeramente entre estaciones.
- La variable considerada fue la precipitación mensual, y se utilizó el índice SPI a escala de 3 meses para definir eventos de sequía.
- Se aplicaron pruebas de homogeneidad (Wald-Wolfowitz y Wallis-Moore) y de tendencia (Mann-Kendall y Spearman Rho) para evaluar la estacionariedad y aleatoriedad de las series.

- Se ajustaron distribuciones marginales (Gamma, Weibull, Log-normal) a las series de duración (DD) y severidad (DS), y se seleccionaron con base en criterios de bondad de ajuste (Kolmogorov–Smirnov, Anderson–Darling, AIC y BIC).
- Se evaluaron 10 cópulas bivariadas (Gaussian, t, Clayton, Frank, Gumbel, Joe, BB1, BB6, BB7, BB8) considerando la dependencia en colas superiores (tail dependence).
- El ajuste óptimo se determinó mediante log-verosimilitud, AIC, BIC y análisis de dependencia con el coeficiente de Kendall y estimadores CFG.

Los principales resultados obtenidos mostraron que las cópulas BB1 y Gumbel ofrecieron el mejor ajuste en la mayoría de estaciones, permitiendo estimar los períodos de retorno conjuntos (TDS y T'DS) para diferentes escenarios de sequía. Por ejemplo, en una estación de elevación media, para una duración de sequía de 11.9 meses y severidad de 16.63, el período de retorno conjunto TDS fue de 137.9 años.

Se concluyó que el uso de cópulas bivariadas mejora sustancialmente la comprensión del riesgo de sequía al capturar la interdependencia entre duración y severidad, especialmente en contextos hidrológicos complejos como los asociados a gradientes altitudinales. Esta aproximación metodológica resulta relevante para la presente tesis, dado que permite extender su aplicación a variables adicionales como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración potencial, favoreciendo una caracterización multivariada integral de las sequías en el sur del Perú.

Samadian et al. (2024), en su estudio titulado “*Joint analysis of drought affected by climate change in Zarinerood watershed, Iran, using copula functions*”, investigaron la frecuencia conjunta de eventos de sequía meteorológica bajo escenarios de cambio climático mediante funciones cópula en la cuenca del río Zarinerood, Irán. Su objetivo fue modelar la duración y severidad de las sequías para los periodos histórico (1959–2019) y futuro (2020–2100), incorporando predictores climáticos CanESM2 bajo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

La metodología empleada comprendió:

- Utilización de datos de precipitación mensual provenientes de tres estaciones sinópticas (Miandoab, Sazez y Tekab) durante el periodo 1959–2019.
- Consideración de variables predictoras como precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, disponibles en los conjuntos CanESM2.

- Cálculo del índice de sequía SPI en ventanas de 6, 12 y 24 meses.
- Ajuste de distribuciones marginales (GEV para duración y logística para severidad), validadas con NSE >0.93 y RMSE <7.8.
- Selección de cópulas (Frank y Galambos) evaluadas mediante NSE, RMSE y comparación con cópulas empíricas.
- Simulación futura de precipitaciones mediante regresión multivariada usando 26 predictores CanESM2.
- Evaluación del desempeño mediante coeficiente de determinación ($R^2 > 0,85$), NSE y RMSE.

Los principales hallazgos revelaron una disminución proyectada en la precipitación promedio bajo el escenario RCP8.5 entre 36–42 %, así como una mayor duración y severidad de las sequías. Las cópulas Frank y Galambos permitieron estimar con alta precisión las probabilidades conjuntas de duración y severidad para eventos futuros.

Se concluyó que la combinación de funciones cópula con escenarios climáticos permite una caracterización probabilística más robusta de las sequías meteorológicas. Esta aproximación es extrapolable a contextos andinos como el sur del Perú, donde se dispone de variables relevantes (precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración potencial), lo que ofrece una base metodológica adecuada para el modelado multivariado de sequías bajo escenarios climáticos.

Eskandaripour y Soltaninia (2025), en su investigación titulada “*Trivariate Frequency Analysis of Droughts Characteristics in Kerman City Using Asymmetric Copula Functions*”, estudiaron la caracterización conjunta de la severidad, duración y pico de eventos de sequía meteorológica en la ciudad de Kerman, Irán, mediante funciones de cópula asimétricas. Su objetivo fue establecer distribuciones trivariadas que permitan estimar periodos de retorno condicionales y conjuntos aplicables a la gestión de recursos hídricos.

La metodología desarrollada comprendió:

- Análisis de datos de precipitación mensual en 13 estaciones meteorológicas entre 1971 y 2019, destacando la estación de Kerman por su representatividad regional.

- Cálculo del índice SPI_{mod} (SPI modificado), sensible a la estacionalidad, del cual se extrajeron las variables de severidad, duración y pico de sequía.
- Ajuste de distribuciones marginales a cada variable (Gamma, Exponencial, Gumbel), validadas con la prueba Kolmogorov–Smirnov.
- Evaluación de correlaciones entre variables mediante coeficientes de Pearson y Spearman, con valores positivos significativos (por ejemplo, 0.84 entre severidad y pico).
- Aplicación del método IFM para estimar parámetros de dependencia en cópulas asimétricas anidadas.
- Ajuste y comparación de 12 funciones de cópula (Clayton, Frank, Galambos, HRT, etc.) mediante RMSE, NSE y máxima verosimilitud (ML).
- Cálculo de probabilidades conjuntas y periodos de retorno condicionales en configuraciones AND y OR.

Los resultados mostraron que la cópula HRT proporcionó el mejor ajuste tanto en modo bivariado como trivariado para todos los sitios, con valores de NSE superiores a 0.9 en la mayoría de las estaciones. Se identificó que las sequías más severas ocurrieron entre 2007 y 2009, mientras que la más prolongada fue de 1999 a 2003. La modelación trivariada permitió estimar con mayor precisión los riesgos combinados de eventos extremos.

Se concluyó que el uso de funciones de cópula asimétricas permite una modelación más precisa de las características interdependientes de la sequía. Esta metodología es extensible a variables climáticas adicionales como la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración potencial, por lo que ofrece una base sólida para el modelado multivariado en regiones como el sur del Perú, especialmente en contextos de cambio climático y escasez hídrica.

En la investigación de Menna et al. (2022), titulada *“Meteorological drought analysis using copula theory for the case of upper Tekeze river basin, Northern Ethiopia”*, se examinó la caracterización multivariada de sequías meteorológicas mediante funciones cópula, integrando los índices SPI y SSI para derivar el MSDI, con el fin de mejorar la estimación de severidad, duración y retorno de eventos extremos en la cuenca alta del río Tekeze, al norte de Etiopía.

La metodología abarcó:

- Uso de datos de precipitación mensual de 20 estaciones meteorológicas y datos satelitales de humedad del suelo del programa CCI-ESA, en el periodo 1982–2020.
- Cálculo de los índices SPI (basado en precipitación) y SSI (basado en humedad del suelo), ajustados a distribuciones Gamma.
- Aplicación del MSDI mediante la combinación de SPI y SSI a través de funciones cópula (Gumbel, Frank, Gaussian, t y Clayton).
- Selección de la cópula óptima según criterios AIC, BIC, máxima verosimilitud, RMSE y NSE, utilizando el paquete MvCAT bajo simulaciones MCMC.
- Evaluación del retorno conjunto de duración y severidad de sequías mediante configuraciones AND y OR, y análisis de tendencias con Mann–Kendall y Sen's Slope.
- Interpolación espacial de SPI, SSI y MSDI mediante Kriging Ordinario en ArcGIS.

Los resultados indicaron que la cópula Gumbel fue óptima para escalas de 3 y 6 meses, y Frank para 12 meses. El MSDI capturó todos los eventos de sequía relevantes entre 1982 y 2020, mostrando mayor capacidad de detección que SPI y SSI por separado. Por ejemplo, el evento de 2015 fue caracterizado con una duración de 4 meses, severidad de 6.4 y período de retorno conjunto de 5.24 años.

Se concluyó que el enfoque multivariado basado en cópulas permite una mejor identificación del riesgo de sequía al integrar múltiples indicadores. Esta metodología puede ser directamente aplicada en el sur del Perú considerando la integración de variables como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y evapotranspiración potencial, favoreciendo modelos predictivos más robustos en escenarios de cambio climático.

Hasan y Abdullah (2022) propusieron una metodología innovadora para el análisis bivariado de sequías agrícolas, utilizando funciones cópula para modelar conjuntamente la duración y severidad de eventos de sequía, en base al Índice Estandarizado de Precipitación Efectiva (SEPI) en el norte de Irak. Esta estrategia busca superar la limitación del uso de humedad del suelo, empleando en su lugar datos de precipitación efectiva como variable clave.

La metodología se estructuró de la siguiente forma:

- Se utilizaron datos de precipitación mensual de dos estaciones meteorológicas durante 50 años (1960–2010).
- Se estimó la precipitación efectiva mediante la fórmula simplificada del método USDA-SCS, validada con correlaciones superiores al 98 %.
- A partir de estos datos se construyó el índice SEPI a escalas de 3 y 6 meses, derivado del SPI, para caracterizar sequías agrícolas.
- Se aplicó la teoría de corridas (run theory) para identificar eventos de sequía con duración y severidad, usando un umbral de SEPI < 0 .
- Se ajustaron distribuciones marginales a las variables: Pareto generalizada (duración) y log-normal (severidad), validadas con pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado.
- Se modeló la distribución conjunta usando cópulas Archimedeanas (Clayton, Frank y Gumbel), seleccionando la mejor mediante RMSE, BIC y NSE.
- Se calcularon periodos de retorno conjuntos y se compararon con análisis univariado.

Los resultados indicaron que la cópula Gumbel fue la más adecuada para ambas escalas temporales y estaciones, con $NSE > 0,99$. Se evidenció que el análisis univariado subestima el riesgo de sequía al no considerar la dependencia entre variables. En contraste, el enfoque bivariado reveló que eventos con duración ≥ 4 meses y severidad $\geq 3,3$ tienen un período de retorno de sólo 3 años, frente a 5 años según análisis univariado.

Se concluyó que el SEPI, al requerir solo datos de precipitación, es altamente aplicable en regiones con limitaciones en datos de humedad del suelo. La estrategia metodológica basada en cópulas es altamente relevante para regiones semiáridas como el sur del Perú, donde se dispone de datos climáticos relacionados como precipitación, temperatura, viento y evapotranspiración, permitiendo extender este enfoque multivariado para caracterizar riesgos agrícolas y climáticos futuros.

Kiafar y colaboradores Kiafar et al. (2020) desarrollaron un análisis bivariado de sequías meteorológicas en la estación de Qazvin, Irán, mediante funciones cópula, incorporando un enfoque novedoso de estimación de parámetros con algoritmos genéticos (GA). El estudio

tuvo como objetivo evaluar la duración y severidad de sequías, optimizando el ajuste de cópulas para mejorar la estimación de probabilidades conjuntas y períodos de retorno.

La metodología consistió en:

- Análisis de datos mensuales de precipitación entre 1964 y 2015, con cálculo del índice SPI para identificar eventos de sequía.
- Extracción de duración y severidad de eventos usando un umbral de $SPI \leq -1$, aplicando teoría de corridas.
- Ajuste de distribuciones marginales: exponencial para duración y gamma para severidad, validadas con la prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- Aplicación de cinco cópulas (Galambos, Frank, Clayton, Gumbel-Hougaard y Plackett) para modelado conjunto, evaluadas mediante RMSE, AIC y NSE.
- Estimación de parámetros de cópula con dos métodos: IFM (Inference Function for Margins) y algoritmo genético (GA).
- Cálculo de probabilidades conjuntas, condicionales y períodos de retorno (TDS y T'_{DS}), incluyendo análisis de dependencia en colas con el coeficiente de Capéraà–Fougeres–Genest.

Los resultados destacaron que la cópula Galambos ofreció el mejor ajuste, con valores de $NSE = 0,939$, $RMSE = 0,0649$ y $AIC = 720,78$ según IFM. No obstante, el uso de GA redujo aún más el error ($RMSE = 0.0567$), mejorando en un 13 % la precisión del modelo. Se estimó que una sequía con duración ≥ 5 meses y severidad $\geq 7,36$ tiene un período de retorno conjunto de hasta 1195 años.

Se concluyó que el uso de algoritmos evolutivos como el GA mejora la precisión en la estimación de parámetros de cópulas, fortaleciendo el análisis de riesgos de sequía. Esta estrategia puede ser replicada en contextos semiáridos como el sur del Perú, aplicando el mismo marco a variables como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y evapotranspiración, con gran potencial para mejorar la predicción de eventos extremos y la planificación hídrica.

Terzi y Öñöz Terzi y Öñöz (2025b), en su estudio titulado “*Drought analysis based on nonparametric multivariate standardized drought index in the Seyhan River Basin*”, propusieron el uso del Índice de Sequía Estandarizado Multivariado no Paramétrico (MSDI) como

herramienta alternativa para caracterizar eventos de sequía integrando componentes meteorológicos e hidrológicos sin depender de distribuciones estadísticas específicas.

La metodología implementada incluyó:

- Uso de datos mensuales de precipitación (10 estaciones meteorológicas) y caudales (hidrológicas) desde 1989 hasta 2011.
- Cálculo de índices SPI (precipitación), SSFI (caudal) y MSDI (precipitación + caudal) para escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses.
- Pruebas de ajuste de distribución (Kolmogorov–Smirnov) que revelaron inadecuación de distribuciones paramétricas para caudales.
- Cálculo de MSDI mediante probabilidades conjuntas empíricas usando la fórmula de Gringorten y estandarización con la distribución normal.
- Evaluación de tendencias mediante la prueba de Mann–Kendall modificada, y análisis de correlación cruzada con índices ENSO, AO y actividad solar mediante wavelet cruzado.

Los principales hallazgos indicaron que el MSDI reflejó con mayor precisión la duración y severidad de eventos de sequía comparado con SPI y SSFI por separado, detectando eventos extensos como el de 2006–2009 (hasta 40 meses). Las correlaciones de MSDI con SPI y SSFI superaron los valores de 0.75, confirmando su robustez. Se observó una relación positiva significativa entre el MSDI y el índice ENSO (Nino 3.4) y negativa con la Oscilación Ártica, lo que sugiere vínculos climáticos consistentes.

Se concluyó que el MSDI no paramétrico ofrece una alternativa sólida y adaptable para monitorear sequías en cuencas con alta variabilidad estacional y limitaciones de datos, como ocurre en la región sur del Perú. Esta metodología puede adaptarse a incluir variables como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración potencial, fortaleciendo el análisis multivariado en tu estudio doctoral.

Aon y Biswas Aon y Biswas (2024) llevaron a cabo un análisis bivariado de sequías meteorológicas en la cuenca del Alto Kangsabati, Bengala Occidental (India), con el fin de estimar la severidad y duración de eventos extremos mediante cópulas, incluyendo mapas espaciales de retorno conjunto para su gestión hidrológica.

La metodología empleada fue:

- Uso de datos de precipitación diaria (1971–2020) en 16 puntos de grilla provistos por el Departamento Meteorológico de India (IMD), acumulados a escala mensual.
- Cálculo del SPI-3 para analizar condiciones de sequía a escala agrícola, y SPI-12 para identificación de años extremos.
- Aplicación de teoría de corridas para extraer eventos de sequía con severidad y duración, empleando umbral $SPI \leq -1$.
- Ajuste de distribuciones marginales (Generalized Pareto) validadas con pruebas K–S y A–D.
- Estimación de dependencia entre variables con coeficientes de Kendall y Spearman (todos $\tau > 0,7$ y $\rho > 0,85$).
- Modelado conjunto mediante cópulas (Gaussian, Frank, Clayton y Ali-Mikhail-Haq), seleccionando la Frank por mejor ajuste (NSE > 0.93).
- Cálculo de períodos de retorno conjuntos en configuraciones OR y AND y determinación de eventos más probables.
- Generación de mapas espaciales de severidad para diferentes niveles de retorno (5 a 100 años) mediante interpolación IDW.

Los resultados revelaron que eventos extremos como el de 2010 presentaron severidades de hasta 18.08 y duración de 14 meses en algunos puntos. Las zonas central y occidental del Alto Kangsabati mostraron mayor propensión a sequías severas en niveles de retorno altos ($\geq 50aos$).

Se concluyó que la modelación bivariada espacial basada en cópulas proporciona herramientas efectivas para el mapeo y priorización de zonas críticas frente a la sequía. Esta metodología es directamente aplicable al sur del Perú, permitiendo incorporar variables adicionales como temperatura, viento, humedad relativa y evapotranspiración para un análisis integral del riesgo hidrometeorológico.

En la investigación desarrollada por Parvaze et al. (2025), titulada *Drought severity index analysis using the copula-based joint deficit index in Greater Himalayas of India*, se propuso

como objetivo principal evaluar las características de la sequía en la cuenca del río Jhelum, mediante la aplicación del índice de déficit conjunto (JDI) basado en funciones cópula.

La metodología consistió en:

- **Población y muestra:** No se reportó una población específica; se trabajó con datos hidrometeorológicos de la cuenca.
- **Estaciones utilizadas:** 7 estaciones meteorológicas distribuidas en el sur, centro y norte de la cuenca del Jhelum.
- **Rango temporal:** Serie histórica de precipitación mensual desde 1980 hasta 2019.
- **Variables consideradas:** Precipitación; la evapotranspiración potencial (PET) también fue analizada como variable de contexto climático.
- **Análisis estadístico previo:** Prueba de Kolmogorov–Smirnov (KS) para normalidad, usando distribución Gamma de dos parámetros. Se imputaron datos faltantes a partir de estaciones vecinas.
- **Modelos estadísticos principales:** Se empleó el índice SPImod y el JDI, este último basado en una cópula empírica de 12 dimensiones para integrar déficits en ventanas de 1 a 12 meses.
- **Validación:** Comparación entre JDI y SPImod mediante análisis gráfico, series temporales y consistencia con registros históricos.

Los principales resultados indicaron que el JDI permite una evaluación más precisa y continua de las sequías, al integrar la información sobre intensidad, duración y frecuencia en múltiples escalas temporales. Se identificó que las sequías han sido más severas y frecuentes durante los últimos 20 años, especialmente en primavera y en la parte sur de la cuenca. El evento más severo se registró entre 1998 y 2003, con un valor mínimo de JDI de -2.9 en enero de 2001. En comparación, el SPImod mostró inconsistencias al evaluar eventos multitemporales.

Se concluyó que el JDI supera a los métodos univariados tradicionales como el SPI, al evitar contradicciones entre escalas temporales y al representar mejor la evolución y la severidad de las sequías. Asimismo, se sugiere su utilidad para sistemas de alerta temprana

y planificación del recurso hídrico. Esta metodología es particularmente relevante para el sur del Perú, ya que puede integrarse con variables clave como la precipitación, PET, y eventualmente humedad relativa y temperatura, con el fin de desarrollar un marco robusto de predicción y monitoreo de sequías regionales.

En el estudio de Yang et al. (2022), cuya investigación se titula *Analyzing spatial–temporal change of multivariate drought risk based on Bayesian copula: Application to the Balkhash Lake basin*, se planteó como objetivo desarrollar un método de análisis multivariado de sequías (BCMA) que combine cópulas bayesianas con análisis espacio-temporal para evaluar el riesgo de sequía en la cuenca del lago Balkhash (Asia Central) durante el período 1901–2020.

La metodología consistió en:

- Población y muestra: No aplica población humana; se analizaron datos climáticos históricos sobre una malla raster.
- Estaciones: Se utilizaron datos mensuales de scPDSI a una resolución de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (grilla de clima global).
- Rango temporal: 1901 a 2020.
- Variables: Duración, severidad y área afectada por la sequía derivadas del scPDSI, que a su vez considera precipitación, temperatura, humedad del suelo y escorrentía (proxy de evapotranspiración).
- Análisis previo: Prueba ADF de estacionariedad, correlaciones de Pearson, Spearman y Kendall.
- Modelos estadísticos: Distribuciones marginales (GEV, Gamma, lognormal, etc.) y cópulas Archimedeanas (Clayton, Frank, Gumbel, Joe) con inferencia Bayesiana (MCMC).
- Validación: AIC, BIC, RMSE y evaluación de parámetros a través de intervalos de credibilidad al 95 %.

Los principales resultados obtenidos fueron: se identificaron 53 eventos de sequía con duración promedio de 10.6 meses, severidad de 19.9 y un 56 % del área afectada. El evento más severo (1973–1977) duró 40 meses y afectó al 95 % del territorio. La mayoría de sequías

ocurrieron en primavera y verano (64.2 %) y se desplazaron en sentido sureste-noroeste. La región del delta del río Ili fue la más afectada (47.2 %). Se hallaron correlaciones significativas entre las variables de duración, severidad y área. Las cópulas de Clayton resultaron óptimas. El riesgo multivariado de sequía varió entre 1.9 % y 59.8 % dependiendo de la tasa de garantía.

Se concluyó que el método BCMA permite evaluar con mayor precisión el riesgo multivariado de sequías al considerar simultáneamente múltiples variables hidrometeorológicas y su dependencia estructural. Esta metodología es especialmente útil para regiones áridas como el sur del Perú, donde variables como la precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y humedad relativa interactúan de forma compleja. Su implementación puede contribuir al diseño de políticas de prevención y gestión de sequías bajo escenarios de cambio climático.

1.1.2. Antecedentes Nacionales

En el estudio de W. J. Cabrera (2023), cuyo título es *"Modelamiento de sequías agrícolas en la región sur del Perú mediante el uso de funciones cópula"*, se planteó como objetivo modelar la incidencia de las sequías agrícolas en la cuenca alta de los ríos Locumba y Caplina utilizando funciones multivariadas de distribución de probabilidad, conocidas como cópulas. La investigación, de enfoque aplicado y cuantitativo, inició con la evaluación del impacto del Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la temperatura del aire y la temperatura de la superficie del mar (TSM) en varias zonas ENSO sobre la ocurrencia de sequías agrícolas. Los resultados iniciales mostraron correlaciones bajas con los índices ENSO, por lo que se optó por utilizar la TSM en la zona 1+2 (TSM1+2) y la temperatura del aire (T) debido a su correlación media. Mediante la prueba estadística de Cramer Von Mises, se determinó que la cópula t-Student es la más adecuada para representar la relación entre los índices SPI3 y EMI, mientras que la cópula Frank fue más apropiada para modelar las relaciones entre SPI3 y la temperatura del aire, así como entre SPI3 y TSM1+2. Finalmente, se construyó una cópula tridimensional para estimar la probabilidad conjunta de ocurrencia de sequías extremas, concluyéndose que estas son más frecuentes bajo temperaturas del aire entre 10°C y 12°C y temperaturas de la superficie del mar en la zona 1+2 entre 24°C y 26°C.

Por otro lado, J. Cabrera et al. (2021) realizaron un análisis sobre la variabilidad espacio-temporal de las sequías en el Perú y su relación con el riesgo asociado al Fenómeno del Niño. Este estudio, de carácter aplicado y enfoque cuantitativo, utilizó series de datos climatológicos e hidrológicos para evaluar la frecuencia, duración e intensidad de las sequías. Los hallazgos revelaron variaciones significativas en el comportamiento espacial y temporal de estos eventos, confirmando que el Fenómeno del Niño incrementa considerablemente el riesgo de sequías en diversas regiones del país. Estos resultados son esenciales para mejorar la gestión de los recursos hídricos y desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

Asimismo, en el estudio de J. W. Cabrera (2019), se planteó como objetivo analizar la relación entre la ocurrencia de sequías y el fenómeno ENSO en el sur del Perú, aplicando un enfoque basado en cópulas. La metodología incluyó el uso de funciones cópula para modelar la dependencia no lineal entre las condiciones de sequía y los eventos de ENSO, permitiendo capturar la complejidad de estas interacciones climáticas. Los resultados evidenciaron una correlación significativa entre las sequías en el sur del Perú y la fase de ENSO, demostrando que el uso de cópulas mejora la capacidad predictiva y ayuda a gestionar los riesgos climáticos en regiones vulnerables a eventos extremos.

Finalmente, Vega-Jácome (2016) se propuso evaluar el riesgo de sequías en el sur del Perú, basándose en la estimación del peligro y la vulnerabilidad a estos eventos. La metodología incluyó el uso de la base de datos PISCO V1.1 del SENAMHI, que contiene datos de precipitación grillada, junto con información espacial sobre factores físicos, ambientales y socioeconómicos. Para estimar el peligro de sequías, se desarrolló el Índice de Peligro de Sequías (DHI) mediante un análisis bivariado de la duración y severidad de estos eventos. La vulnerabilidad se determinó considerando variables como la elevación, pendiente, uso del suelo, textura del suelo, disponibilidad de presas de agua, distancia a ríos, densidad poblacional e Índice de Desarrollo Humano (IDH). Como resultado, se generaron mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de sequías para la región sur del Perú, identificándose 24 distritos con riesgo de sequías muy alto y 210 distritos con riesgo alto en los 11 departamentos estudiados (Lima, Apurímac, Ayacucho, Arequipa, Cusco, Huancavelica, Ica, Junín, Moquegua, Puno y Tacna). Este estudio destaca la importancia de adoptar un enfoque integral para evaluar y gestionar los riesgos de sequía en una región altamente vulnerable.

Tabla 1
Síntesis de estudios sobre sequías con modelos de cópula

Autores (Año)	País / Región	Tipo de sequía	Estaciones	Índice	Método utilizado
Alizadeh-Sh et al. (2025)	Irán	Meteorológica	100 estaciones sinópticas	nSPEI-3S	Cóputas heterotación
Parvaze et al. (2025)	India (Gran Himalaya)	Meteorológica	7 estaciones meteorológicas	SPImod, JDI	Cóputas variables
Esit y Yuce (2023)	Turquía (Ceyhan)	Meteorológica	24 estaciones meteorológicas	SPI-3	Cóputas (BB1) pitac
Shahbeygi et al. (2025)	Irán	Meteorológica, agrícola, hidrológica	19 estaciones	SPI, SRI, PD-SI, CJMI	Cóputas (Gur) cipita temp del pirac
Terzi y Önöz (2025)	Turquía (Ceyhan)	Meteorológica e Hidrológica	4 meteo + 4 hidrológicas	SPI, SSFI, MSDI	Cóputas esca cauc

BIBLIOGRAFÍA

- Aon, S., & Biswas, S. (2024). Spatially distributed bivariate meteorological drought analysis using copula technique in a semi-arid river basin of West Bengal, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 2885-2901. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04790-w>
- Cabrera, J., Mejía, J., & Guevara-Pérez, E. (2021). Modelación probabilística de la relación entre ENSO y sequías agrícolas en el sur de Perú. *Revista Ingeniería UC*, 28(1), 59-68. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.13>
- Cabrera, J. W. (2019). Relación entre la ocurrencia de sequía y el fenómeno Enso en el sur del Perú: un análisis de cópulas. *38th IAHR World Congress*, 3750-3756. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0161>
- Cabrera, W. J. (2023). *Modelamiento de sequías agrícolas en la región sur del Perú mediante el uso de funciones cópula* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/item/07>
- Esit, M., & Yuce, M. I. (2023). Copula-based bivariate drought severity and duration frequency analysis considering spatial-temporal variability in the Ceyhan Basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 151, 1113-1131. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04317-9>
- Eskandaripour, M., & Soltaninia, S. (2025). Trivariate Frequency Analysis of Droughts Characteristics in Kerman City Using Asymmetric Copula Functions. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07194-3>
- Hasan, I. F., & Abdullah, R. (2022). Agricultural Drought Characteristics Analysis Using Copula. *Water Resources Management*, 36, 5915-5930. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03331-w>
- Kiafar, H., Babazadeh, H., Sedghi, H., & Saremi, A. (2020). Analyzing drought characteristics using copula-based genetic algorithm method. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 745. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05703-1>
- Menna, B. Y., Mesfin, H. S., Gebrekidan, A. G., Siyum, Z. G., & Tegene, M. T. (2022). Meteorological drought analysis using copula theory for the case of upper Tekeze river

- basin, Northern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 621-638. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04061-0>
- Parvaze, S., Kumar, R., Mirabbasi, R., & Allaie, S. P. (2025). Drought severity index analysis using the copula-based joint deficit index in greater Himalayas of India. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 217. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05449-4>
- Samadian, M., Asadi, E., Ghorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2024). Joint analysis of drought affected by climate change in Zarinehrood watershed, Iran, using copula functions. *Acta Geophysica*, 72, 3631-3645. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01306-6>
- Terzi, T. B., & Öñöz, B. (2025a). Análisis avanzado de sequías mediante un nuevo índice multivariado basado en cópulas: un estudio de caso de la cuenca del río Ceyhan. *Sustainable Water Resources Management*, 11(11), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01189-5>
- Terzi, T. B., & Öñöz, B. (2025b). Drought analysis based on nonparametric multivariate standardized drought index in the Seyhan River Basin. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07234-y>
- Vega-Jácome, F. (2016). *Análisis del riesgo de sequía en el sur del Perú* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/108>
- Yang, X., Li, Y. P., Huang, G. H., & Zhang, S. Q. (2022). Analyzing spatial-temporal change of multivariate drought risk based on Bayesian copula: Application to the Balkhash Lake basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 787-804. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04062-z>

ANEXO A: [TÍTULO DEL ANEXO]