

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

Parvaze et al. (2025) llevaron a cabo una investigación titulada *Análisis del índice de severidad de la sequía utilizando el índice de déficit conjunto basado en cópula en el Gran Himalaya de la India*, cuyo objetivo principal fue evaluar integralmente las características de la sequía en la cuenca del río Jhelum, en el valle de Cachemira, mediante el Índice de Déficit Conjunto (JDI) basado en funciones cópula. El estudio utilizó datos mensuales de precipitación recolectados en siete estaciones meteorológicas durante el periodo 1980–2019. Los investigadores calcularon el JDI utilizando una cópula empírica de 12 dimensiones para analizar simultáneamente múltiples estados de déficit que van desde uno hasta doce meses. Para validar la eficacia del JDI, compararon los resultados con los obtenidos mediante el índice modificado estandarizado de precipitación (SPImod). El valor más bajo registrado del JDI para la cuenca fue de -2.9 en enero de 2001, mostrando que este índice identifica con mayor precisión las condiciones de sequía emergentes y persistentes en comparación con SPImod. El análisis estadístico incluyó pruebas de ajuste mediante el test de Kolmogorov-Smirnov para evaluar la idoneidad de la distribución Gamma para la precipitación. Los resultados destacaron que las sequías en la cuenca se hicieron más frecuentes e intensas durante las últimas dos décadas estudiadas (2000–2019), particularmente en la región sur, con una mayor incidencia y severidad durante la primavera. Los autores concluyeron que el JDI ofrece una evaluación más robusta y completa de las características de la sequía, siendo especialmente útil para mejorar la planificación y gestión de los recursos hídricos ante la creciente vulnerabilidad climática de la región.

Shao et al. (2025) desarrollaron la investigación titulada *Identificación tridimensional de eventos de sequía y evaluación de la probabilidad de riesgo de sequía meteorológica multivariada basada en cópulas en la cuenca del río Huai, China*, cuyo objetivo fue analizar el riesgo de sequía meteorológica desde una perspectiva tridimensional, utilizando funciones cópula tipo Regular Vine (R-Vine). El estudio se llevó a cabo en la cuenca alta y media del

río Huai, utilizando datos de 19 estaciones meteorológicas entre 1981 y 2022, incluyendo precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, insolación y velocidad del viento. Se seleccionaron los conjuntos óptimos de datos de precipitación y evapotranspiración (PRECL y HPET, respectivamente), con base en criterios como NRMSE, NSD y coeficientes de correlación. Para la identificación de eventos de sequía se utilizó el índice SPEI-3, y se aplicó un método tridimensional para calcular duración, área afectada y severidad, ajustando sus distribuciones marginales mediante modelos como EXP, GPA y GAM, seleccionados con base en pruebas KS, AIC y BIC. Las dependencias entre variables fueron modeladas usando cópulas bivariadas (Frank, Gumbel, Survival Joe) y trivariadas mediante la estructura R-Vine, seleccionada según el método de Dissmann y evaluada mediante máxima verosimilitud, CVM, AIC y BIC. Los resultados mostraron que los eventos más comunes fueron de corta duración, gran área y baja severidad, y que el modelo R-Vine ofreció mayor precisión al capturar la estructura de dependencia entre variables. Finalmente, se concluyó que el análisis multivariado con identificación tridimensional proporciona una herramienta robusta para la gestión de sequías en regiones agrícolas vulnerables, como lo es la cuenca del río Huai.

Alizadeh-Sh et al. (2025) realizaron un estudio titulado *Análisis multivariado de la frecuencia de sequías en Irán basado en nuevas estructuras de cópulas archimedeanas heterogéneas y homogéneas*, cuyo objetivo fue desarrollar un enfoque integral para estimar la frecuencia de sequías en Irán utilizando estructuras de cópulas multivariadas, incluyendo una innovadora cópula heterogénea-asimétrica. La investigación abarcó todo el territorio de Irán, considerando 30 subcuencas de segundo orden y seis cuencas principales (primer orden), con base en datos climáticos diarios y mensuales de 100 estaciones sinópticas entre 1986 y 2021. Las variables de sequía analizadas fueron duración, severidad, pico e intervalo entre eventos, extraídas del índice estandarizado no paramétrico de precipitación-evapotranspiración (nSPEI-3S), calculado mediante balance hídrico climático y estimaciones de la evapotranspiración potencial con el método de Penman–Monteith. Se aplicó el método de regionalización geoestadística Co-Kriging para interpolar las variables climáticas y se ajustaron funciones de distribución marginal como Pareto generalizada y GEV, seleccionadas mediante pruebas de bondad de ajuste (AIC, BIC, MLLF). Para modelar la dependencia conjunta, se emplearon estructuras de cópulas homogéneas (Gumbel, Joe, Frank, etc.) y

heterogéneas-asimétricas, siendo esta última la más eficaz para representar correlaciones en las colas. Se estimaron probabilidades y períodos de retorno conjuntos en tres escenarios: conjunción (AND), disyunción (OR) y condicional. Los resultados mostraron que el período de retorno conjunto cuatrivariado más alto fue de 142.6 años en la cuenca CS-6, mientras que el menor fue de 1.44 años en CP-8, destacando así la utilidad de este enfoque para identificar regiones de alto riesgo. Concluyeron que el uso simultáneo de múltiples variables en análisis multivariado con cópulas heterogéneas mejora la precisión y fiabilidad en la evaluación del riesgo de sequía y constituye una herramienta clave para la planificación hídrica en condiciones de cambio climático.

Kim y Seo (2025) desarrollaron la investigación titulada *Comparación de los períodos de retorno de sequía mediante distribución de probabilidad univariada, bivariada y función cópula bajo escenarios de SSP*, con el objetivo de comparar el análisis de frecuencia de sequías mediante enfoques univariados, bivariados tradicionales y funciones cópula, bajo escenarios históricos y futuros de cambio climático. El estudio se llevó a cabo en las regiones de Hongcheon y Jeongseon, Corea del Sur, utilizando datos mensuales de precipitación histórica y simulada para los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, con series que abarcan hasta 98 años. Las variables analizadas fueron la duración y severidad de la sequía, determinadas a partir del método de umbral constante y ajustadas a las distribuciones Gumbel (para duración) y Gamma (para severidad), seleccionadas mediante pruebas K-S, CVM, AIC y BIC. Para la estimación de la distribución conjunta, se utilizó la función cópula de Clayton, que resultó más adecuada frente a la distribución bivariada normal tradicional, la cual subestimó la frecuencia de sequías severas. El análisis se centró en el cálculo de períodos de retorno conjuntos mediante criterios AND, OR y condicionales, evidenciando que, bajo el escenario SSP5-8.5, los eventos de sequía con duración y severidad simultáneamente extremas se presentan con mayor frecuencia. En contraste, el escenario SSP1-2.6 presentó los mayores períodos de retorno, indicando menor frecuencia de eventos críticos. Los autores concluyeron que el uso de funciones cópula, especialmente en contextos donde las variables no siguen la misma distribución marginal, ofrece estimaciones más realistas del riesgo de sequía, superando las limitaciones de los modelos bivariados clásicos y mejorando la planificación en escenarios de cambio climático.

Samadian et al. (2024) desarrollaron la investigación titulada *Análisis conjunto de la se-*

quía afectada por el cambio climático en la cuenca del río Zarinehrood, Irán, mediante funciones cópula, cuyo objetivo fue analizar la frecuencia conjunta de la severidad y duración de sequías meteorológicas bajo escenarios de cambio climático utilizando funciones cópula. El estudio fue llevado a cabo en la cuenca del río Zarinehrood, Irán, considerando datos mensuales de precipitación provenientes de tres estaciones pluviométricas en un período base (1959–2019) y proyecciones para un período futuro (2020–2100), generadas mediante los escenarios climáticos RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 del modelo CanESM2. Utilizaron el índice estandarizado de precipitación (SPI) para identificar los eventos de sequía, determinando que aproximadamente el 45 % del período base presentó déficit de precipitación y alrededor del 8 % experimentó sequías severas. La metodología implicó la aplicación de regresión multivariada para simular las precipitaciones futuras y la posterior realización del análisis conjunto de frecuencia mediante cópulas, especialmente la cópula de Frank, seleccionada tras comparar diversas familias de cópulas por criterios estadísticos. Sus resultados revelaron que en el escenario más pesimista (RCP8.5), las precipitaciones medias disminuirían entre un 20 % y un 50 %, aumentando así la probabilidad de sequías más severas y prolongadas en comparación con escenarios más optimistas como el RCP2.6. Concluyeron que, de no implementarse estrategias efectivas de mitigación de gases de efecto invernadero, la cuenca del río Zarinehrood enfrentará riesgos incrementados de sequías extremas en el futuro.

Esit y Yuce (2023) desarrollaron una investigación titulada *Análisis bivariado de la frecuencia de la severidad y duración de la sequía basado en cópulas considerando la variabilidad espacio-temporal en la cuenca de Ceyhan, Turquía*, realizada en dicha cuenca ubicada en Turquía. El objetivo principal del estudio fue identificar la función de cópula más adecuada para modelar conjuntamente la frecuencia, severidad y duración de las sequías considerando diferentes niveles de elevación (alta, media y baja) en la cuenca. Para ello, utilizaron datos mensuales de precipitación provenientes de 24 estaciones meteorológicas, definiendo eventos de sequía mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI) con una escala temporal de tres meses. Aplicaron diversas pruebas estadísticas como Mann–Kendall y Spearman Rho para evaluar la dependencia entre variables, y seleccionaron las distribuciones marginales más apropiadas utilizando criterios como Anderson–Darling, Kolmogorov–Smirnov y Cramér–von Mises. Finalmente, determinaron las mejores familias de cópulas mediante cri-

terios AIC, BIC y métodos de máxima verosimilitud, destacando las cópulas Gumbel y BB1 por presentar un mejor desempeño al capturar dependencias en las colas superiores. Como resultados principales, concluyeron que existe una alta variabilidad espacial y temporal en la frecuencia conjunta de duración y severidad de las sequías, resaltando la importancia del análisis bivariado basado en cópulas para mejorar significativamente la evaluación del riesgo de sequías y aportar información valiosa para la gestión hídrica regional.

Bazrafshan et al. (2023) realizaron un estudio titulado *Análisis trivariado del riesgo de sequía meteorológica en Irán bajo escenarios de cambio climático*, cuyo objetivo fue analizar el riesgo trivariado de sequía meteorológica considerando simultáneamente la severidad, duración y magnitud de la sequía, bajo escenarios históricos y futuros de cambio climático. La investigación fue realizada en Irán, utilizando datos mensuales de precipitación de 39 estaciones sinópticas durante el periodo 1966–2015, y proyecciones futuras para 2016–2050 generadas mediante el modelo climático CanESM2, ajustado con el modelo estadístico de reducción de escala SDSM bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Se utilizó el índice estandarizado de precipitación a 12 meses (SPI-12) para identificar y caracterizar los eventos de sequía. Las características de la sequía (duración, severidad y magnitud) fueron extraídas mediante la teoría de runs y ajustadas con distribuciones marginales como Weibull, gamma, log-normal y log-logística, seleccionadas según AIC y BIC. Para modelar la dependencia entre las variables, se aplicaron cópulas elípticas (t-Student y normal) y arquimedianas (Frank, Clayton, Joe y Ali–Mikhail–Haq), siendo las cópulas t y normal las más adecuadas en más del 87 % de las estaciones. El análisis trivariado permitió estimar probabilidades condicionales y períodos de retorno para diferentes combinaciones de características de sequía. Los resultados indicaron que aunque no se observaron cambios estadísticamente significativos en las tendencias de precipitación o sequía, el riesgo condicional aumentará bajo escenarios futuros, especialmente en regiones del este, noreste y centro de Irán. Se concluyó que el análisis trivariado basado en cópulas proporciona una herramienta eficaz para la planificación de recursos hídricos en contextos de incertidumbre climática creciente.

Jahannemaei et al. (2023) desarrollaron la investigación titulada *Hacia el análisis de las sequías meteorológicas en el oeste de Irán: un enfoque multivariado basado en cópulas de vida*, cuyo objetivo fue analizar multivariadamente las características de la sequía meteorológica (duración, severidad, pico de SPEI y tiempo entre eventos) en el oeste de Irán utilizando

estructuras D-vine de cópulas. El estudio se realizó en trece estaciones meteorológicas con datos mensuales de 1990 a 2019, incluyendo variables como precipitación, temperaturas (media, máxima, mínima), horas de sol y nublados, velocidad del viento y humedad relativa. La sequía se identificó mediante el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI-1), calculado con el método de Penman–Monteith. Las distribuciones marginales para cada variable de sequía fueron ajustadas (Log-normal, Gamma, Weibull, GEV, etc.) y evaluadas con pruebas K–S, chi-cuadrado, AIC y BIC. Luego, se construyeron estructuras D-vine con cópulas bivariadas Archimedeanas (Frank, Clayton, Joe, Gumbel) y elípticas (Gaussiana y t-Student), seleccionadas mediante máxima verosimilitud. Se analizaron tres escenarios de modelado para encontrar la mejor estructura. La cópula Frank fue la más frecuente en los pares seleccionados. Los resultados indicaron que las zonas sur y oeste de la región presentan mayor susceptibilidad a sequías severas, con períodos de retorno conjuntos de hasta 201 años para eventos extremos ($D \geq 6$, $S \geq 7$, $M \geq 2$). Finalmente, la simulación de series temporales mediante cópulas D-vine mostró buen ajuste respecto a las observaciones, concluyendo que este enfoque permite una evaluación más precisa de las sequías en regiones montañosas y semiáridas.

Isfahani et al. (2022) realizaron la investigación titulada *Evaluación de las tendencias de sequía agrometeorológica en Irán durante el período 1985–2018*, con el objetivo de analizar la evolución espacial y temporal de las sequías meteorológicas y agrícolas en Irán mediante el Índice de Sequía Estandarizado Multivariado (MSDI). Para ello, se emplearon datos mensuales de precipitación y humedad del suelo superficial (SSM) obtenidos de 99 estaciones sinópticas a lo largo del país entre 1985 y 2018. Las propiedades de la sequía (duración y severidad) se derivaron de las series temporales del MSDI-12, aplicando la teoría de runs con un umbral de -1. Se utilizaron funciones cópula (del tipo Archimedeana) para calcular probabilidades conjuntas, seleccionadas con base en los criterios de bondad de ajuste AIC y Cramér–von Mises, y parametrizadas mediante el método de máxima verosimilitud pseudo (MPL). El análisis de tendencia se llevó a cabo mediante el test de Mann-Kendall con pre-blanqueo libre de tendencia (TFPW) para evitar el sesgo por autocorrelación, y se aplicó el test de homogeneidad normal estándar (SNH) para la detección de puntos de cambio estructural. Los resultados revelaron que las regiones sur, sureste, noreste y algunas zonas del oeste presentan sequías más largas y severas. Además, se identificaron dos períodos

críticos (1991–2000 y 2006–2010) con rupturas estructurales significativas en las series del MSDI, asociadas tanto a factores climáticos como antropogénicos (uso intensivo de tierras agrícolas, subsidios y políticas públicas). La frecuencia de sequías aumentó entre 2 y 5 veces tras el punto de cambio en muchas estaciones. Los autores concluyeron que las sequías agrometeorológicas en Irán muestran una tendencia creciente en duración, severidad y frecuencia, lo que exige políticas urgentes de manejo sostenible del agua y la agricultura.

Menna et al. (2022) en su investigación titulada *Análisis de la sequía meteorológica mediante la teoría de cópulas para el caso de la cuenca alta del río Tekeze, norte de Etiopía*, desarrollada en la cuenca del río Tekeze, analizaron la sequía meteorológica utilizando índices multivariados basados en la teoría de cópulas. El estudio empleó datos mensuales de precipitación provenientes de 20 estaciones meteorológicas y datos satelitales de humedad del suelo durante el periodo 1982–2020. Las variables consideradas fueron la precipitación y la humedad del suelo, analizadas mediante los índices estandarizados de precipitación (SPI) y de humedad del suelo (SSI). A partir de estos índices, se determinó la distribución de probabilidad conjunta utilizando distintas familias de cópulas (Gaussiana, t-Student, Clayton, Frank y Gumbel), seleccionando la cópula Gumbel para escalas temporales de 3 y 6 meses y la cópula Frank para la escala de 12 meses como las más adecuadas, mediante criterios estadísticos AIC, BIC, RMSE y NSE. Los análisis estadísticos realizados incluyeron la prueba no paramétrica de Mann–Kendall para la detección de tendencias temporales y el estimador de pendiente de Sen, revelando una tendencia positiva generalizada en la sequía para todas las escalas temporales analizadas en la cuenca. Los resultados mostraron que el Índice de Sequía Estandarizado Multivariado (MSDI), basado en las funciones cópula, identificó eventos de sequía recientes como el ocurrido en 2015, destacando su severidad y duración con mayor precisión que los índices univariados. En cuanto a las conclusiones, los autores destacaron que el análisis multivariado proporciona información más precisa y relevante sobre la dinámica espacial y temporal de la sequía, siendo útil para mejorar la planificación y manejo del riesgo hídrico en la región.

Hasan y Abdullah (2022) realizaron un estudio titulado *Análisis de las características de la sequía agrícola mediante cópula*, cuyo objetivo fue analizar la frecuencia conjunta de la duración y severidad de la sequía agrícola utilizando la metodología de cópulas. La investigación se llevó a cabo en dos estaciones meteorológicas ubicadas en el norte de Irak,

utilizando datos mensuales de precipitación durante el periodo 1960–2010. Los autores emplearon el Índice de Precipitación Efectiva Estandarizado (SEPI) en escalas temporales de 3 y 6 meses, derivado del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), para caracterizar los eventos de sequía agrícola. Se consideraron como variables principales la duración y la severidad de las sequías agrícolas, ajustando la distribución Generalizada de Pareto para la duración y la distribución Lognormal para la severidad, identificadas como las más adecuadas mediante pruebas estadísticas Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado. Para el análisis estadístico conjunto, se compararon tres cópulas arquimedianas (Clayton, Frank y Gumbel), siendo la cópula Gumbel la que mejor desempeño mostró según los criterios estadísticos RMSE, BIC y NSE. El análisis bivariado mostró que el período de retorno conjunto de eventos de sequía agrícola fue más corto en comparación con el período de retorno univariado, indicando que los métodos bivariados permiten una mejor estimación del riesgo de sequías al evitar su subestimación. Finalmente, concluyeron que el uso del SEPI es particularmente ventajoso para regiones donde los datos de humedad del suelo son escasos o inexistentes, proporcionando así información útil para la mitigación del riesgo de sequías en la agricultura de secano.

Kiafar et al. (2020) llevaron a cabo una investigación titulada *Análisis de las características de la sequía mediante un método de algoritmo genético basado en cópulas*, cuyo objetivo principal fue evaluar la duración y severidad de la sequía meteorológica utilizando funciones cópula y algoritmos genéticos en la estación de Qazvin, Irán, durante el periodo 1964–2015. Para este propósito, calcularon los índices de precipitación estandarizada (SPI) a partir de datos históricos mensuales de precipitación. Ajustaron distribuciones exponencial y gamma para la duración y severidad de la sequía, respectivamente, confirmadas mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, aplicaron cinco tipos de funciones cópula (Gumbel Hougard, Galambos, Frank, Plackett y Clayton), determinando que la cópula Galambos presentó el mejor desempeño según los criterios estadísticos RMSE, máxima verosimilitud, criterio de información de Akaike (AIC) y coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSC). Para estimar los parámetros de la función Galambos, utilizaron un algoritmo genético (GA), demostrando su superioridad frente al método tradicional de inferencia basada en marginales (IFM), reduciendo el RMSE en un 13 %. Finalmente, emplearon la cópula Galambos para calcular probabilidades condicionales y períodos de retorno

conjuntos de los eventos de sequía, concluyendo que estos resultados aportan información valiosa para la gestión y planificación adecuada de los recursos hídricos bajo condiciones de sequía.

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.

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 meteorológicos/agrometeorológicos basados en cópulas relevantes para la predicción de sequías en el sur del Perú.

Autor (Año)	Índice(s)	Variables	Familia de cópula	Escala temporal	Aporte clave
Alizadeh et al. (2025)	nSPEI-3S	P, ET ₀ , HR	Homogénea / heterogénea	Mensual multiescala	Metodología SPEI–Penman–Monteith; dependencias no lineales P–ET ₀ –HR.
Jahannemaei et al. (2023)	SPEI-1	P, T, HR, Viento	D-Vine	Mensual	Integra HR y viento; selección óptima de cópulas por pares.
Shao et al. (2025)	SPEI-3	P, T, Viento	R-Vine	Mensual	Modela severidad–duración con Vine; truncado eficiente para ≥ 19 estaciones.
Bazrafshan et al. (2023)	SPI-12	P	Elípticas y Archimedeanas	Mensual (12 m)	Comparativa Archimedean vs Elíptica; justifica escala anual.
Isfahani et al. (2022)	SPI, SSM→MSDI	P, HR	Varias + tendencias	Mensual	HR como proxy agrícola; análisis de tendencias conjuntos.
Menna et al. (2022)	SPI→MSDI	P, HR	Gumbel, Frank	Mensual	Fusión SPI con HR para índice combinado MSDI.
Parvaze et al. (2025)	SPImod, JDI	P	Empírica 12-D	Mensual	Cópula de alta dimensión con precipitación multiescala (12-D).
Kiafar et al. (2020)	SPI	P	Galambos + GA	Mensual	Optimización de parámetros copulares mediante algoritmo genético.
Kim & Seo (2025)	SPI	P	Clayton	Mensual + SSP	Incorpora escenarios SSP en SPI sin ET ₀ .
Esit & Yuce (2023)	SPI-3	P	Gumbel, BB1	Mensual	Comparación Archimedeanas simples para escalas cortas.
Samadian et al. (2024)	SPI	P	Frank	Mensual + RCP	Proyecciones climáticas RCP 2.6–8.5 aplicadas a SPI.
Hasan & Abdullah (2022)	SEPI	P efectiva	Gumbel, Clayton, Frank	Mensual	Ajuste de precipitación efectiva para sequía agrícola.

Tabla 2

Síntesis de estudios meteorológicos basados en cópulas relevantes p.

Referencia	Índice(s)	Variables	Familia de cópula	Escala	Aporte clave
Alizadeh-Sh et al. (2025)	nSPEI-3S	P, ET ₀ , HR	Homogénea / heterogénea	Mensual multiescala	Metodología SPEI–Penman–Monteith; dependencias no lineales P–ET ₀ –HR.
Parvaze et al. (2025)	SPImod, JDI	P	Empírica 12-D	Mensual	Cópula de alta dimensión con precipitación multiescala.
Kim y Seo (2025)	SPI	P	Clayton	Mensual + SSP	Escenarios SSP para SPI sin ET ₀ .
Shao et al. (2025)	SPEI-3	P, T, Viento	R-Vine	Mensual	Modela severidad–duración con Vine; truncado eficiente para ≥ 19 estaciones.
Samadian et al. (2024)	SPI	P	Frank	Mensual + RCP	Proyecciones climáticas RCP 2.6–8.5 aplicadas a SPI.
Jahannemaei et al. (2023)	SPEI-1	P, T, HR, Viento	D-Vine	Mensual	Integra HR y viento; selección óptima de cópulas por pares.
Esit y Yuce (2023)	SPI-3	P	Gumbel, BB1	Mensual	Comparación Archimedeanas simples (escalas cortas).
Bazrafshan et al. (2023)	SPI-12	P	Elípticas y Archimedeanas	Mensual (12 m)	Comparativa Archimedeana vs Elíptica; justifica escala anual.
Isfahani et al. (2022)	SPI, SSM→MSDI	P, HR	Archimedeanas + tendencias	Mensual	HR como proxy agrícola; análisis de tendencias conjuntos.
Menna et al. (2022)	SPI→MSDI	P, HR	Gumbel, Frank	Mensual	Fusión SPI con HR para índice combinado MSDI.
Hasan y Abdullah (2022)	SEPI	P efectiva	Gumbel, Clayton, Frank	Mensual	Duración–severidad de sequía agrícola con precipitación efectiva.

Continúa en la siguiente página

Referencia	Índice(s)	Variables	Familia de cópula	Escala	Aporte clave
Kiafar et al. (2020)	SPI	P	Galambos + GA	Mensual	Optimización de parámetros con algoritmo genético.

Descripción de la base de datos

La base de datos utilizada en esta investigación contiene registros mensuales de variables meteorológicas provenientes de estaciones ubicadas en la región sur del Perú. Esta información fue solicitada oficialmente al **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)**.

Las estaciones se distribuyen en distintas altitudes y zonas geográficas del sur peruano, y cada una de ellas incluye información georreferenciada como la *latitud*, *longitud*, y coordenadas UTM (*UTM_X*, *UTM_Y*) junto con la zona correspondiente. El rango temporal abarca varios años, permitiendo análisis climáticos a escala mensual.

Las variables contenidas en la base de datos son:

- **Precipitación (mm)**
- **Temperatura (°C)**
- **Humedad relativa (%)**
- **Velocidad media del viento (m/s)**
- **PET (Evapotranspiración Potencial)**
- **Estación astronómica (Primavera, Verano, etc.)**

Cabe destacar que todas estas variables, a excepción de la **PET**, provienen directamente de SENAMHI. La **evapotranspiración potencial (PET)** fue calculada a partir de las variables meteorológicas disponibles, como la precipitación, temperatura, humedad y viento, aplicando fórmulas reconocidas en climatología, como la de Penman-Monteith.

Esta base de datos constituye el insumo fundamental para el análisis de sequías en el ámbito regional, y permite evaluar tanto tendencias climáticas como procesos de estimación de variables derivadas con fines agroclimáticos e hidrológicos.

1.2. Análisis exploratorio de datos

El primer paso en el análisis de datos es la exploración de las variables de interés como la Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Evapotranspiración Potencial. En este sentido, se han realizado gráficos de dispersión y de correlación

para observar la relación entre las variables. A continuación se presentan los resultados obtenidos. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la exploración de datos, que incluyen gráficos de dispersión y correlación entre las variables de interés: Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Evapotranspiración Potencial. Estos gráficos permiten observar la relación entre las variables y su comportamiento a lo largo del tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alizadeh-Sh, R., Safavi, H. R., & Nikoo, M. R. (2025). Iran's multivariate drought frequency analysis based on novel heterogeneous and homogeneous Archimedean copula structures. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 172. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05375-5> (Citado en las pag. 2, 12).
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Mozaffari, E., Azhdari, Z., & Shekari, M. (2023). Trivariate risk analysis of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135, 52. <https://doi.org/10.1007/s00703-023-00988-9> (Citado en las pag. 5, 12).
- 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> (Citado en la pag. 9).
- 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> (Citado en la pag. 9).
- 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> (Citado en la pag. 9).
- 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> (Citado en las pag. 4, 12).
- 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> (Citado en las pag. 7, 12).
- Isfahani, P. M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Assessing agrometeorological drought trends in Iran during 1985–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, 150, 251-262. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04159-5> (Citado en las pag. 6, 12).

- Jahannemaei, N., Khosravinia, P., Sanikhani, H., & Mirabbasi, R. (2023). Toward analyzing meteorological droughts in western Iran: a multivariate approach based on vine copulas. *Natural Hazards*, 116(2), 1903-1929. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05747-4> (Citado en las pag. 5, 12).
- Kiafar, H., Babazadeh, H., Sedghi, H., & Saremi, A. (2020). Analyzing drought characteristics using copula-based genetic algorithm method. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(745), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05703-1> (Citado en las pag. 8, 13).
- Kim, S. U., & Seo, D.-I. (2025). Comparison of the drought return periods by univariate, bivariate probability distribution, and copula function under SSPs scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 67. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05248-3> (Citado en las pag. 3, 12).
- 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> (Citado en las pag. 7, 12).
- 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> (Citado en las pag. 1, 12).
- Samadian, M., Asadi, E., Ghorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2024). Joint analysis of drought affected by climate change in Zarinerood watershed, Iran, using copula functions. *Acta Geophysica*, 72, 3631-3645. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01306-6> (Citado en las pag. 3, 12).
- Shao, J., Wang, J., Zhu, D., He, J., Wang, W., Wu, B., & Zhang, G. (2025). Three-dimensional identification of drought events and copula-based multivariate meteorological drought risk probability assessment in the Huai River Basin, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 90. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05318-6> (Citado en las pag. 1, 12).

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>
(Citado en la pag. 10).

ANEXO A: [TÍTULO DEL ANEXO]