



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Predicción Estacional de los Indicadores de Sequía  
Prolongada en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Jiménez Cando, Dayana Monserrat

Tutor/a: Pérez Martín, Miguel Ángel

Cotutor/a externo: Mondéjar Martín, Nieves

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

**Trabajo Fin de Máster**

***PREDICCIÓN ESTACIONAL DE LOS  
INDICADORES DE SEQUÍA PROLONGADA EN  
LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL  
JÚCAR***

**Intensificación: *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS***

**Autor:**

***DAYANA MONSERRAT JIMÉNEZ CANDO***

**Tutor:**

***DR. ING. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN***

**Cotutor:**

***ING. NIEVES MONDÉJAR MARTÍN***

***JUNIO, 2025***



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**mihma**  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente

## RESUMEN DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

| Datos del proyecto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título del TFM en español:</b> PREDICCIÓN ESTACIONAL DE LOS INDICADORES DE SEQUÍA PROLONGADA EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Título del TFM en inglés:</b> SEASONAL PREDICTION OF PROLONGED DROUGHT INDICATORS IN THE JÚCAR RIVER BASIN DISTRICT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Título del TFM en Valenciano:</b> Predicció Estacional dels Indicadors de Sequera Prolongada en la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Alumno:</b> DAYANA MONSERRAT JIMÉNEZ CANDO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Tutor:</b> DR. ING. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Cotutor:</b> ING. NIEVES MONDÉJAR MARTÍN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Fecha de Lectura:</b> JUNIO, 2025                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Resumen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>La sequía es un fenómeno natural caracterizado por un déficit significativo de agua en un periodo de tiempo y área determinada, lo que genera graves impactos en las actividades sociales, económicas y ambientales. Por esta razón, es fundamental llevar a cabo un monitoreo constante, así como su evaluación y caracterización, lo cual se realiza a través de indicadores específicos de sequía.</p> <p>En España, la gestión de sequías se formalizó en el año 2001 mediante el Plan Hidrológico Nacional, que asignó a los organismos de cuenca la elaboración de Planes Especiales de Sequía (PES) con el objetivo de minimizar los impactos ambientales económicos y sociales causados por la sequía y con esto establecer medidas de acción. Actualmente, la Demarcación Hidrográfica del Júcar tiene un doble sistema de indicadores: el Indicador de Estado de Sequía Prolongada (IES), orientado al análisis meteorológico, y el Indicador de Estado de Escasez (IEE), enfocado en la capacidad operativa del sistema para atender demandas.</p> <p>El Indicador de Estado de Sequía Prolongada (IES) utiliza como variable principal la precipitación acumulada, la Confederación Hidrográfica del Júcar ha definido 47 indicadores distribuidos en 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), cuyo objetivo es identificar escenarios de normalidad y sequía prolongada. Por otro lado, los</p> |

Indicadores de Escasez Coyuntural emplean diversas variables como la precipitación, aforos, entradas a embalses, niveles piezométricos y volúmenes embalsados. En este caso, existen 41 indicadores distribuidos en 9 Unidades Territoriales de Escasez (UTE), con el objetivo de determinar escenarios de escasez clasificados en normalidad, prealerta, alerta y emergencia.

Uno de los avances más significativos entre el PES vigente 2018 y el próximo PES 2024 (actualmente en revisión), es la incorporación del análisis predictivo del Sistema de Indicadores. Esta implementación busca predecir los escenarios de sequía prolongada y escasez coyuntural en las unidades territoriales de estudio.

El trabajo propuesto tiene como objetivo desarrollar un programa de predicción estacional de sequías prolongadas, capaz de determinar la probabilidad de que los próximos meses presenten condiciones más secas, húmedas o normales, con el fin de servir como herramienta de alerta para facilitar la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

La metodología de este proyecto está estructurada por dos bloques principales. El primer bloque es la obtención del Índice de Estado de Sequía Prolongada Histórico, el cual será el punto de partida para realizar las predicciones. El segundo bloque se basa en la metodología propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para analizar la variabilidad climática futura. Para la primera predicción se utilizan los registros de precipitación histórica, considerando cada año hidrológico de la serie como base para el análisis. La segunda predicción se centra en las predicciones climáticas generadas por los centros especializados en modelización climática. En este proyecto, se emplearán los datos proporcionados por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF), que ofrece mapas de precipitación y temperatura. Para los dos bloques establecidos se utilizará la metodología de cálculo del Índice de Estado de Sequía Prolongada definida en el Plan Especial de Sequías-CHJ 2018, el cual identifica los escenarios de sequía prolongada y normalidad.

El desarrollo de este proyecto se realizó mediante un programa implementado en lenguaje Python, que permitiera seleccionar diferentes periodos de cálculos. Este programa es diseñado para automatizar los procesos metodológicos y facilitar la generación de resultados numéricos, gráficos e informes para las 13 Unidades

Territoriales de Sequía, facilitando una visión integral de los escenarios futuros de sequía prolongada.

### Resum

La sequera és un fenomen natural caracteritzat per un dèficit significatiu d'aigua en un període de temps i àrea determinada, la qual cosa genera greus impactes en les activitats socials, econòmiques i ambientals. Per esta raó, és fonamental dur a terme un monitoratge constant, així com la seua avaluació i caracterització, la qual cosa es realitza a través d'indicadors específics de sequera.

A Espanya, la gestió de sequeres es va formalitzar l'any 2001 mitjançant el Pla Hidrològic Nacional, que va assignar als organismes de conca l'elaboració de Plans Especials de Sequera (PES) amb l'objectiu de minimitzar els impactes ambientals econòmics i socials causats per la sequera i amb això establir mesures d'acció. Actualment, la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer té un doble sistema d'indicadors: l'Indicador d'Estat de Sequera Prolongada (IES), orientat a l'anàlisi meteorològica, i l'Indicador d'Estat d'Escassetat (IEE), enfocat en la capacitat operativa del sistema per a atendre demandes.

L'Indicador d'Estat de Sequera Prolongada (IES) utilitza com a variable principal la precipitació acumulada, la Confederació Hidrogràfica del Xúquer ha definit 47 indicadors distribuïts en 13 Unitats Territorials de Sequera (\*UTS), l'objectiu de la qual és identificar escenaris de normalitat i sequera prolongada. D'altra banda, els Indicadors d'Escassetat Conjuntural empren diverses variables com la precipitació, aforaments, entrades a embassaments, nivells piezomètrics i volums embassats. En este cas, existixen 41 indicadors distribuïts en 9 Unitats Territorials d'Escassetat (UTE), amb l'objectiu de determinar escenaris d'escassetat classificats en normalitat, prealerta, alerta i emergència.

Un dels avanços més significatius entre el PES vigent 2018 i el pròxim PES 2024 (actualment en revisió), és la incorporació de l'anàlisi predictiva del Sistema d'Indicadors. Esta implementació busca predir els escenaris de sequera prolongada i escassetat conjuntural en les unitats territorials d'estudi.

El treball proposat té com a objectiu disenrotllar un programa de predicció estacional de sequeres prolongades, capaç de determinar la probabilitat que els pròxims mesos presenten condicions més seques, humides o normals, amb la finalitat de servir com a ferramenta d'alerta per a facilitar la presa de decisions en la gestió de recursos hídrics.

La metodologia d'este projecte està estructurada per dos blocs principals. El primer bloc és l'obtenció de l'Índex d'Estat de Sequera Prolongada Històric, el qual serà el punt de partida per a realitzar les prediccions. El segon bloc es basa en la metodologia proposada per l'Organització Meteorològica Mundial (WMO) per a analitzar la variabilitat climàtica futura. Per a la primera predicció s'utilitzen els registres de precipitació històrica, considerant cada any hidrològic de la sèrie com a base per a l'anàlisi. La segona predicció se centra en les prediccions climàtiques generades pels centres especialitzats en modelització climàtica. En este projecte, s'empraran les dades proporcionades pel Centre Europeu de Predicció a Termini Mitjà (\*ECMWF), que oferix mapes de precipitació i temperatura. Per als dos \*boques establits s'utilitzarà la metodologia de càlcul de l'Índex d'Estat de Sequera Prolongada definida en el Pla Especial de Sequeres-CHJ 2018, el qual identifica els escenaris de sequera prolongada i normalitat.

El disenrotllament d'este projecte es va realitzar mitjançant un programa implementat en llenguatge \*Python, que \*permetre seleccionar diferents períodes de càlculs. Este programa és dissenyat per a automatitzar els processos metodològics i facilitar la generació de resultats numèrics, gràfics i informes per a les 13 Unitats Territorials de Sequera, facilitant una visió integral dels escenaris futurs de sequera prolongada.

### Summary

Drought is a natural phenomenon characterized by a significant water deficit over a specific period and area, with severe impacts on social, economic, and environmental activities. As a result, continuous monitoring, evaluation, and characterization through specific drought indicators are essential.

In Spain, drought management was formalized in 2001 with the National Hydrological Plan, which tasked river basin authorities with developing Special

Drought Plans (PES) to minimize drought-related impacts and establish actionable measures. Currently, the Júcar River Basin District employs a dual indicator system: the Prolonged Drought State Indicator (IES), which focuses on meteorological analysis, and the Scarcity State Indicator (IEE), which assesses the system's operational capacity to meet water demands.

The IES primarily relies on accumulated precipitation, with 47 indicators distributed across 13 Territorial Drought Units (UTS) to identify normal and prolonged drought scenarios. In contrast, the Scarcity State Indicators incorporate variables such as precipitation, streamflow, reservoir inflows, piezometric levels, and stored volumes, with 41 indicators across 9 Territorial Scarcity Units (UTE), classifying scenarios as normal, pre-alert, alert, or emergency.

Key improvement in the transition from the 2018 PES to the upcoming 2024 PES (currently under review) is the integration of predictive analysis into the indicator system, aiming to forecast prolonged drought and temporary scarcity scenarios in the territorial units.

This enhancement aims to develop a seasonal prediction program for prolonged droughts, capable of estimating the probability of drier, wetter, or normal conditions in the coming months. The goal is to provide an early warning tool for water resource management.

The methodology is divided into two main components. The first involves generating the Historical Prolonged Drought State Index as a basis for predictions. The second applies the World Meteorological Organization (WMO) methodology for future climate variability analysis. The first prediction uses historical precipitation records, considering each hydrological year in the series, while the second uses climate forecasts from specialized modeling centers, specifically data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), which provides precipitation and temperature maps. Both blocks use the Prolonged Drought State Index calculation method defined in the 2018 Special Drought Plan (CHJ) to identify drought and normality scenarios.

This project was implemented through a Python program, enabling the selection of various calculation periods. Designed to automate methodological processes, the program streamlines the generation of numerical results, graphs, and reports for the

13 Territorial Drought Units, offering a comprehensive outlook on future prolonged drought scenarios.

**Palabras clave:** Sequía, Sequía prolongada, Unidades territoriales, Precipitación, índice de Estado de Sequía.

## ÍNDICE

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>2. ÁMBITO .....</b>                                           | <b>3</b>  |
| <b>3. ESTADO DEL ARTE.....</b>                                   | <b>5</b>  |
| 3.1 TIPOS DE SEQUÍA.....                                         | 6         |
| 3.2 ÍNDICES DE SEQUÍA .....                                      | 7         |
| 3.3 GESTIÓN DE SEQUÍA EN ESPAÑA .....                            | 8         |
| 3.4 PREDICCIÓN CLIMÁTICA.....                                    | 17        |
| 3.5 PREDICCIÓN HIDROLÓGICA .....                                 | 19        |
| <b>4. METODOLOGÍA.....</b>                                       | <b>21</b> |
| <b>5. RESULTADOS .....</b>                                       | <b>24</b> |
| 5.1 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA PYTHON .....                 | 25        |
| 5.2 BLOQUE 1: ÍNDICE DE ESTADO SEQUÍA PROLONGADA HISTÓRICA ..... | 32        |
| 5.3 BLOQUE2: PREDICCIÓN ESTACIONAL.....                          | 40        |
| 5.4 GESTIÓN DE ARCHIVOS RESULTANTES .....                        | 65        |
| 5.5 ANÁLISIS DE LA PREDICCIÓN .....                              | 69        |
| 5.6 RESULTADOS FINALES .....                                     | 72        |
| <b>6. CONCLUSIONES .....</b>                                     | <b>75</b> |
| <b>7. LÍNEAS FUTURAS.....</b>                                    | <b>77</b> |
| <b>8. REFERENCIAS .....</b>                                      | <b>78</b> |

## ÍNDICE DETALLADO

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>2. ÁMBITO</b>                                                                                           | <b>3</b>  |
| <b>3. ESTADO DEL ARTE</b>                                                                                  | <b>5</b>  |
| 3.1 TIPOS DE SEQUÍA                                                                                        | 6         |
| 3.2 ÍNDICES DE SEQUÍA                                                                                      | 7         |
| 3.3 GESTIÓN DE SEQUÍA EN ESPAÑA                                                                            | 8         |
| 3.3.1 <i>Gestión de sequía en la Demarcación Hidrográfica del Júcar</i>                                    | 10        |
| 3.3.2 <i>Índice de estado de sequía prolongada definido por la Confederación Hidrográfica del Júcar</i>    | 12        |
| 3.4 PREDICCIÓN CLIMÁTICA                                                                                   | 17        |
| 3.5 PREDICCIÓN HIDROLÓGICA                                                                                 | 19        |
| 3.5.1 <i>Predicción Hidrológica España</i>                                                                 | 19        |
| <b>4. METODOLOGÍA</b>                                                                                      | <b>21</b> |
| <b>5. RESULTADOS</b>                                                                                       | <b>24</b> |
| 5.1 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA PYTHON                                                                 | 25        |
| 5.1.1 <i>Archivos de entrada</i>                                                                           | 25        |
| 5.1.2 <i>Archivo de control</i>                                                                            | 27        |
| 5.1.3 <i>Lectura de datos</i>                                                                              | 29        |
| 5.1.4 <i>Procesamiento de datos</i>                                                                        | 29        |
| 5.1.5 <i>Archivo eco de comprobación</i>                                                                   | 30        |
| 5.2 BLOQUE 1: ÍNDICE DE ESTADO SEQUÍA PROLONGADA HISTÓRICA                                                 | 32        |
| 5.2.1 <i>Estadísticos mensuales de precipitación</i>                                                       | 33        |
| 5.2.2 <i>Índice de Estado de Sequía Prolongada histórico</i>                                               | 35        |
| 5.3 BLOQUE2: PREDICCIÓN ESTACIONAL                                                                         | 40        |
| 5.3.1 <i>Predicción estacional basada en datos de precipitación histórica</i>                              | 40        |
| 5.3.2 <i>Predicción estacional basada en los datos del ECMWF</i>                                           | 52        |
| 5.3.3 <i>Predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) combinando datos históricos y datos del ECMWF</i> | 64        |
| 5.4 GESTIÓN DE ARCHIVOS RESULTANTES                                                                        | 65        |
| 5.5 ANÁLISIS DE LA PREDICCIÓN                                                                              | 69        |
| 5.6 RESULTADOS FINALES                                                                                     | 72        |
| <b>6. CONCLUSIONES</b>                                                                                     | <b>75</b> |
| <b>7. LÍNEAS FUTURAS</b>                                                                                   | <b>77</b> |
| <b>8. REFERENCIAS</b>                                                                                      | <b>78</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Superficie de las Unidades Territoriales de Sequía (UTS) en la Demarcación Hidrográfica del Júcar..... | 3  |
| Tabla 2. Pluviómetros o estación meteorológica por cada UTS (CHJ, 2028). ....                                   | 12 |
| Tabla 3. Estructura del archivo de entrada "06uts.dat". ....                                                    | 25 |
| Tabla 4. Estructura del archivo de datos "utsjucar_pre_salreg_hist.asc". ....                                   | 26 |
| Tabla 5. Estructura del archivo de datos "utsjucar_pre_salreg_ecmwf_members.asc".<br>.....                      | 27 |
| Tabla 6. Parámetros generales del programa en el archivo de control 04datatuts. ..                              | 28 |
| Tabla 7. Parámetros correspondientes al Bloque metodológico 1 definidos en el<br>archivo "04datuts". ....       | 28 |
| Tabla 8. Parámetros correspondientes al Bloque metodológico 2 definidos en el<br>archivo "04datuts". ....       | 29 |
| Tabla 9 Documento resultante 03_1predic_hist_IES. ....                                                          | 46 |
| Tabla 10. Documento resultante 03_2predic_hist_casos_perce_IES. ....                                            | 47 |
| Tabla 11. Documento resultante 03_3predic_ecmwf_IES. ....                                                       | 58 |
| Tabla 12. Documento resultante 03_4predic_ecmwf_casos_perce_IES. ....                                           | 58 |
| Tabla 13. Primer experimento de condiciones iniciales diferentes, mes enero. ....                               | 69 |
| Tabla 14. Segundo experimento de condiciones iniciales diferentes, mes noviembre.<br>.....                      | 70 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica y división en Unidades Territoriales de Sequía (CHJ, 2018). .....                              | 4  |
| Figura 2. Desfase temporal en la propagación de anomalías (Entekhabi et al. 1992). 6                                          |    |
| Figura 3. Doble sistema de indicadores de sequía (CHJ,2018). .....                                                            | 11 |
| Figura 4. Metodología establecida por la CHJ. ....                                                                            | 12 |
| Figura 5. Ubicación de los pluviómetros puntuales del SAIH para cada UTS. ....                                                | 14 |
| Figura 6. Definición de umbral de Sequía Prolongada (0.3). ....                                                               | 16 |
| Figura 7. Ejemplo de aplicación de la predicción climática estacional (ECMWF, 2024).<br>.....                                 | 18 |
| Figura 8. Explicativa de los contenidos de la predicción hidrológica para las<br>aportaciones acumuladas (MITECO, 2024). .... | 20 |
| Figura 9. Esquema de los bloques metodológicos a implementarse. ....                                                          | 22 |
| Figura 10. Archivos de entrada para el programa PYTHON. ....                                                                  | 25 |
| Figura 11. Diagrama representativo del procesamiento de datos. ....                                                           | 30 |
| Figura 12. Archivo eco generado por PYTHON. ....                                                                              | 31 |
| Figura 13. Ubicación de los pluviómetros UTS Alto Turia.....                                                                  | 32 |
| Figura 14. Precipitación Areal UTS Alto Turia 1975-2024. ....                                                                 | 33 |
| Figura 15. Diagrama representativo del procesamiento para obtención de estadísticos<br>mensuales. ....                        | 34 |
| Figura 16. Serie histórica mensual UTS Alto Turia. ....                                                                       | 35 |
| Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de cálculo del Índice de Estado de Sequía<br>(IES). ....                             | 37 |
| Figura 18. Precipitación Areal UTS Alto Turia 1975-2024. ....                                                                 | 38 |
| Figura 19. SPI 12 para UTS Alto Turia. ....                                                                                   | 38 |
| Figura 20. IES-UTS Alto Turia.....                                                                                            | 39 |
| Figura 21. Gráficos resultantes 03_1grafico_predi_hist_p12_UTS. ....                                                          | 43 |
| Figura 22. Gráficos resultantes 03_1grafico_predi_hist_P12__zoom_UTS. ....                                                    | 43 |
| Figura 23. Gráficos resultantes 03_2grafico_predi_hist_SPI12_UTS. ....                                                        | 44 |
| Figura 24. Gráficos resultantes 03_2grafico_predi_hist_SPI12_zoom_UTS. ....                                                   | 44 |
| Figura 25. Gráficos resultantes 03_3grafico_predi_hist_IES_UTS. ....                                                          | 45 |
| Figura 26. Gráficos resultantes 03_3grafico_predi_hist_IES_zoom_UTS. ....                                                     | 45 |
| Figura 27. Gráficos resultantes 03_3grafico_predi_hist_IES_zoom_perc_UTS.....                                                 | 46 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) con datos históricos. .... | 47 |
| Figura 29. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, Precipitación acumulada 12M. UTS Alto Turia. ....                               | 48 |
| Figura 30. Ampliación de predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, Precipitación acumulada 12M. UTS Alto Turia. ....                 | 49 |
| Figura 31. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, SPI 12. UTS Alto Turia. ....                                                    | 49 |
| Figura 32. Ampliación de la predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, SPI 12. UTS Alto Turia. ....                                   | 50 |
| Figura 33. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, IES. UTS Alto Turia. ....                                                       | 50 |
| Figura 34. Ampliación de la Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, IES. UTS Alto Turia. ....                                      | 51 |
| Figura 35. Resultados gráficos de la predicción del IES (rangos percentiles) con datos históricos. ....                              | 51 |
| Figura 36 Predicción del IES de las 13 UTS. ....                                                                                     | 52 |
| Figura 37. Gráficos resultantes 04_1grafico_predi_ecmwf_p12_UTS. ....                                                                | 54 |
| Figura 38. Gráficos resultantes 04_2grafico_predi_ecmwf_P12__zoom_UTS. ....                                                          | 54 |
| Figura 39. Gráficos resultantes 04_3grafico_predi_ecmwf_SPI12_UTS. ....                                                              | 55 |
| Figura 40. Gráficos resultantes 04_4grafico_predi_ecmwf_SPI12_zoom_UTS. ....                                                         | 55 |
| Figura 41. Gráficos resultantes 04_5grafico_predi_ecmwf_IES_UTS. ....                                                                | 56 |
| Figura 42. Gráficos resultantes 04_6grafico_predi_ecmwf_IES_zoom_UTS. ....                                                           | 56 |
| Figura 43. Gráficos resultantes 04_7grafico_predi_hist_IES_zoom_perc_UTS. ....                                                       | 57 |
| Figura 44. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) con datos históricos. .... | 59 |
| Figura 45. Predicción de precipitación acumulada12 con datos del ECMWF. ....                                                         | 60 |
| Figura 46. Predicción de precipitación acumulada12 con datos del ECMWF. ....                                                         | 60 |
| Figura 47. Predicción de SPI 12 con datos del ECMWF. ....                                                                            | 61 |
| Figura 48. Ampliación de la predicción de SPI 12 con datos del ECMWF. ....                                                           | 61 |
| Figura 49. Predicción del IES con datos del ECMWF. ....                                                                              | 62 |
| Figura 50. Ampliación de la predicción del IES con datos del ECMWF. ....                                                             | 62 |
| Figura 51. Resultados gráficos de la predicción del IES (rangos percentiles) con datos del ECMWF. ....                               | 63 |
| Figura 52. Predicción del IES con datos del ECMWF de las 13 UTS. ....                                                                | 63 |
| Figura 53. PDF resultante, Estadísticos mensuales. ....                                                                              | 65 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 54. PDF resultante, IES histórico.....                                                             | 66 |
| Figura 55. PDF resultante, Predicción con datos históricos. ....                                          | 67 |
| Figura 56. PDF resultante, Predicción con datos ECMWF.....                                                | 67 |
| Figura 57. PDF resultante, Predicción combinada. ....                                                     | 68 |
| Figura 58. Metodología combinada, predicción desde enero 2025 del IES UTS Alto Turia. ....                | 72 |
| Figura 59. Metodología combinada, predicción desde enero 2025 para predicción del IES de las 13 UTS. .... | 73 |
| Figura 60. Metodología combinada, predicción desde marzo 2025 del IES UTS Alto Turia. ....                | 73 |
| Figura 61. Metodología combinada, predicción desde marzo 2025 para predicción del IES de las 13 UTS. .... | 74 |

# 1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno natural recurrente que, debido a su carácter progresivo y a la notable variabilidad climática e hidrológica de regiones como la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ), representa uno de los principales retos para la gestión sostenible de los recursos hídricos. La DHJ, con una superficie aproximada de 42.756 km<sup>2</sup> dividida en 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), constituye un entorno idóneo para el análisis y validación de metodologías avanzadas de monitoreo y predicción de sequías, dada la frecuencia e intensidad de estos episodios y su impacto sobre los sectores agrícola, urbano y ambiental (Confederación Hidrográfica del Júcar [CHJ], 2018).

En el contexto europeo y nacional, la gestión de la sequía ha evolucionado hacia un enfoque preventivo y adaptativo, impulsado por la Directiva Marco del Agua, la Estrategia de la UE sobre adaptación al cambio climático y la legislación española, que han promovido la integración de sistemas de indicadores y la elaboración de Planes Especiales de Sequía (PES).

En la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ), PES vigente establece un sistema dual de indicadores para la gestión integral de la sequía y la escasez de recursos hídricos. Por un lado, los indicadores de sequía prolongada se basan en el cálculo del Índice de Estado de Sequía Prolongada (IES), obtenido a partir de los registros de precipitación distribuidos en 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS) y permite evaluar y clasificar los escenarios entre normalidad y sequía prolongada. Por otro lado, los indicadores de escasez coyuntural integran múltiples variables operativas para calcular el Índice de Estado de Escasez (IEE) en 9 Unidades Territoriales de Escasez (UTE), clasificando los escenarios en normalidad, prealerta, alerta y emergencia. Esta doble aproximación garantiza una respuesta coordinada y eficiente ante episodios de estrés hídrico, activando medidas progresivas de gestión en función del riesgo identificado y facilitando la toma de decisiones para mitigar los impactos sociales, económicos y ambientales asociados a la sequía en la DHJ.

De cara a la revisión y actualización de los próximos Planes Especiales de Sequía, la normativa ambiental y las directrices nacionales exigen la incorporación de sistemas

de predicción estacional tanto para los indicadores de sequía como de escasez, con el objetivo de anticipar escenarios de riesgo y reforzar la capacidad de respuesta de los organismos de cuenca (CHJ, 2024). Esta exigencia responde a la necesidad de contar con herramientas que permitan prever, con mayor antelación y fiabilidad, la evolución de las condiciones hidrológicas y climáticas en un contexto de creciente variabilidad y cambio climático.

En este marco, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar una herramienta de predicción estacional de sequías prolongadas, capaz de determinar la probabilidad de que los próximos meses presenten condiciones más secas, húmedas o normales. Esta herramienta, implementada en Python, automatiza el cálculo y la interpretación de los indicadores oficiales, proporcionando alertas tempranas y facilitando la toma de decisiones informadas en la gestión de los recursos hídricos. La metodología propuesta se fundamenta en la recopilación y análisis de datos históricos y en la integración de predicciones climáticas generadas por centros especializados, siguiendo las directrices de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization [WMO], 2021) y del Plan Especial de Sequía de la CHJ.

Cabe destacar que este proyecto cuenta con el apoyo y financiación de la Confederación Hidrográfica del Júcar mediante una beca de seis meses, lo que refuerza su relevancia institucional y su alineación con las estrategias nacionales y europeas para la adaptación y mitigación de los efectos de la sequía.

## 2. ÁMBITO

La metodología desarrollada en este proyecto es de carácter genérico y puede ser implementada en diferentes regiones o demarcaciones hidrográficas. En el presente trabajo, la aplicación se centra en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ), que abarca una superficie aproximada de 42.756 km<sup>2</sup> (excluyendo las aguas costeras).

La Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) no solo se caracteriza por su extensión y diversidad climática, sino también por su significativa población y complejidad administrativa. En el año 2021, la DHJ albergaba aproximadamente a 5.130.362 habitantes distribuidos a lo largo de su territorio. Esta demarcación comprende partes de cinco comunidades autónomas, siendo la Comunitat Valenciana la de mayor proporción con un 49,40% de la superficie total, seguida por Castilla-La Mancha con un 37,68%, Aragón con un 12,57%, Cataluña con un 0,21% y la Región de Murcia con un 0,15%. Además, la DHJ cuenta con 79 sistemas de abastecimiento que suministran agua a poblaciones iguales o superiores a 20.000 habitantes, distribuidos entre 66 municipios y 13 mancomunidades o consorcios.

En términos de análisis de sequías, el área se divide en 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), cada una con características propias y superficies variables, como se muestra en la Tabla 1. La notable variabilidad climática e hidrológica de estas unidades convierte a la DHJ en un entorno adecuado para el análisis y validación de la metodología propuesta.

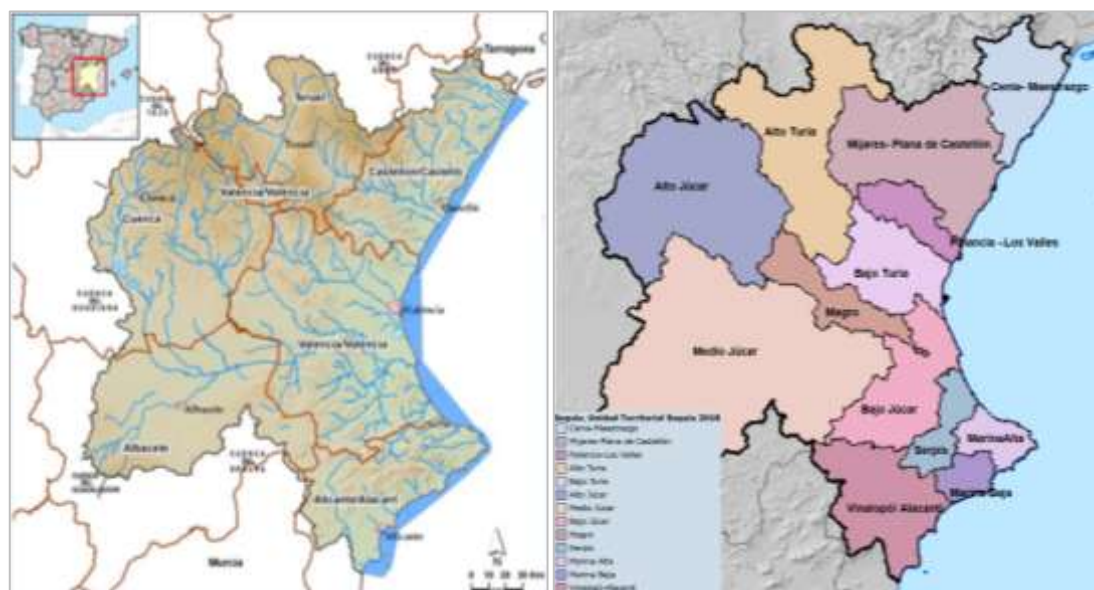
*Tabla 1. Superficie de las Unidades Territoriales de Sequía (UTS) en la Demarcación Hidrográfica del Júcar.*

| Código UTS | Nombre UTS                   | Área excluyendo aguas costeras (km <sup>2</sup> ) |
|------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| UTS 1      | Cenia - Maestrazgo           | 2.033                                             |
| UTS 2      | Mijares - Plana de Castellón | 4.819                                             |
| UTS 3      | Palancia - Los Valles        | 1.087                                             |
| UTS 4A     | Alto Turia                   | 4.884                                             |
| UTS 4B     | Bajo Turia                   | 2.348                                             |
| UTS 5A     | Magro                        | 1.534                                             |

|              |                     |               |
|--------------|---------------------|---------------|
| UTS 5B       | Alto Júcar          | 6.304         |
| UTS 5C       | Medio Júcar         | 11.657        |
| UTS 5D       | Bajo Júcar          | 2.713         |
| UTS 6        | Serpis              | 985           |
| UTS 7        | Marina Alta         | 838           |
| UTS 8        | Marina Baja         | 606           |
| UTS 9        | Vinalopó - Alacantí | 2.948         |
| <b>Total</b> |                     | <b>42.756</b> |

La figura 1 proporcionando una visión general de su extensión y localización dentro de la demarcación hidrográfica. Esta información resulta fundamental para contextualizar los análisis posteriores, ya que permite identificar las zonas más susceptibles a la sequía y priorizar la toma de decisiones en materia de gestión hídrica.

*Figura 1. Ubicación geográfica y división en Unidades Territoriales de Sequía (CHJ, 2018).*



### 3. ESTADO DEL ARTE

La sequía es un fenómeno natural que siempre ha sido parte de la variabilidad climática. Existen diferentes definiciones del término “sequía”, la Organización Meteorológica Mundial define como *“un período seco prolongado en el ciclo climático natural que puede ocurrir en cualquier parte del mundo. Suele ser un fenómeno de inicio lento causado por la falta de precipitaciones”*. Al referirnos a situaciones con ausencia prolongada de precipitación, se hace mención a la sequía de origen meteorológico, la cual al prologarse por un periodo de tiempo mayor puede dar origen a otras formas de sequías con mayores impactos (Ravelo, Sanz Ramos, & Douriet Cárdenas, 2014).

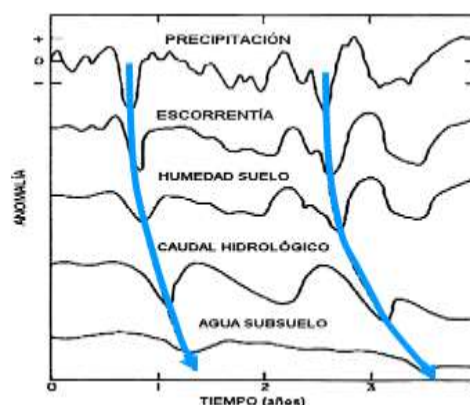
### 3.1 TIPOS DE SEQUÍA

Los diferentes tipos de sequías se determinan por la variable y el desfase temporal de análisis (Figura 2), dado que es un fenómeno que se desarrolla de manera progresiva y puede pasar desapercibida. La cronología de la sequía inicia con la sequía meteorológica, continua la edáfica (también conocida como agricultura), hidrológica y social o estructural (Wilhite & Glantz, 1985; Ravelo et al., 2014; Necco Carlomagno & Aiello, 2021).

El sector agrícola es el primer afectado por la sequía. Este tipo de sequía se refiere a la disminución de humedad del suelo, reduciendo el suministro para que los cultivos se desarrollen con normalidad. La demanda de agua de los cultivos varía según la especie, tipo de cultivo y se relaciona con las características biológicas y propiedades físicas del suelo. Las variables necesarias para el monitoreo de esta sequía es la precipitación, temperatura y humedad del suelo (Ravelo et al., 2014). La sequía hidrológica se define como la disminución de la disponibilidad de agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico (Nalbantis, 2008). Se refiere a valores anormalmente bajos en caudales de ríos y niveles bajos en lagos, embalses y niveles piezométricos (Van Loon, 2015). Finalmente, la sequía socioeconómica acopla los impactos sociales y económicos de las sequías antes mencionadas. Se refiere a la incapacidad del sistema hídrico para satisfacer las demandas requerida y limita el correcto funcionamiento de los servicios ecosistémicos (Mehran et al., 2015).

Por este motivo, resulta esencial enfocar los esfuerzos en el análisis y seguimiento de la sequía meteorológica, ya que constituye la etapa inicial del proceso y su identificación temprana es crucial para una gestión efectiva del riesgo.

*Figura 2. Desfase temporal en la propagación de anomalías (Entekhabi et al. 1992).*



## 3.2 ÍNDICES DE SEQUÍA

Para comprender la dinámica y los impactos de la sequía se necesita identificar las características como duración, intensidad y extensión espacial, las cuales se pueden determinar mediante índices de sequías. A nivel mundial existen diferentes tipos de índices que integran diferentes parámetros meteorológicos e hidrológicos, lo cual depende del objetivo de análisis y el tipo de sequía a estudiar. Los índices más utilizados a nivel mundial son el SPI y PSDI:

- Índice de precipitación estandarizada (SPI) es utilizado para identificar los valores anómalos de precipitación comparado con la media durante un periodo de tiempo específico, es decir es utilizado para analizar la sequía meteorológica. Este índice diferencia 7 categorías, que oscilan en valores adimensionales tanto positivos como negativos. Para condiciones de sequía, se consideran los siguientes rangos: de -1.00 a -1.49 como sequía moderada, de -1.50 a -1.99 como sequía severa, y valores menores o iguales a -2.00 como sequía extrema. Por otro lado, para condiciones de humedad, se clasifican los valores de 1.00 a 1.49 como humedad moderada, de 1.50 a 1.99 como muy húmedo, y valores mayores o iguales a 2.00 como humedad extrema. Los valores entre -0.99 y 0.99 se consideran condiciones normales o cercanas a lo normal, cubriendo así todo el espectro de anomalías de precipitación (McKee et al., 1993).
- Índice de severidad de Palmer (PDSI) se utiliza para analizar la sequía edáfica, obteniendo como resultado la oferta y demanda de la humedad del suelo mediante balances hídricos que toman en cuenta la temperatura, precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración. Clasifica las condiciones de sequía y humedad en 11 categorías, valores mayores o iguales a 4 como humedad extrema y valores menores o iguales a -4 como sequía extrema (Palmer, 1965).

### 3.3 GESTIÓN DE SEQUÍA EN ESPAÑA

A nivel europeo, la Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/60/CE, junto con otras iniciativas y comunicaciones de la Comisión Europea, ha promovido la integración de la gestión de la sequía en la planificación hidrológica, el desarrollo de sistemas de indicadores y la adopción de medidas preventivas y de mitigación.

En este marco, la Unión Europea ha desarrollado una serie de documentos y estrategias que han orientado la gestión de la sequía en los Estados miembros. Entre los hitos más relevantes se encuentran:

- La Comunicación sobre “Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en la Unión Europea” (2007), que subraya la importancia de asegurar el suministro de agua y de definir políticas de gestión eficiente.
- El Informe del Plan de gestión de la sequía, que incluye indicadores específicos y recomendaciones para la elaboración de planes nacionales y regionales.
- La creación del Observatorio Europeo de la Sequía (OES) en 2012, que centraliza la información y facilita la coordinación y el intercambio de experiencias entre los Estados miembros.
- La Estrategia de la UE sobre adaptación al cambio climático (2013) y los informes de evaluación de la escasez de agua y sequía en los Estados miembros (2015-2016), que refuerzan la necesidad de adoptar medidas de adaptación y de integrar la gestión de la sequía en las políticas de cambio climático.

Estos avances han contribuido a que la gestión de la sequía en España se oriente hacia un enfoque más preventivo, basado en la planificación y adoptando medidas en función de la gravedad.

España ha desarrollado un marco normativo propio que ha transformado la gestión de la sequía en el país. El hito fundamental fue la aprobación del Plan Hidrológico Nacional (PHN), Ley 10/2001, el cual delegó que el Ministerio de Medio Ambiente estableciera un sistema global de indicadores hidrológicos que permitiera prever las situaciones de sequía y sirviera de referencia para la declaración formal de situaciones de alerta y eventual sequía. Además, la ley obligó a los organismos de cuenca a elaborar y actualizar cada seis años los Planes Especiales de Sequía (PES).

El Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA, RD Legislativo 1/2001) complementa este marco, otorgando a los organismos de cuenca facultades para fijar regímenes de explotación, condicionar o limitar usos del dominio público hidráulico y adoptar medidas extraordinarias en situaciones excepcionales. Además, el Reglamento de Planificación Hidrológica (RD 907/2007) completando la transposición de la Directiva Marco de Agua al ordenamiento jurídico español y establece la obligación de integrar la gestión de la sequía en los planes hidrológicos de cuenca.

Durante los episodios de sequía más severos, especialmente en los periodos 2004-2009 y 2014-2018, el Gobierno ha aprobado numerosos Reales Decretos y Reales Decretos-Ley que han permitido adoptar medidas urgentes por los efectos de la sequía en diferentes cuencas hidrográficas. Estas normativas han facilitado la modificación temporal de las condiciones de uso del agua, la priorización de usos, la realización de obras de emergencia y la concesión de ayudas a los sectores afectados, especialmente la agricultura y el abastecimiento urbano.

La Comisión Europea en sus informes de 2013-2016, destaca la importancia de diferenciar los indicadores de sequía y escasez para una gestión más precisa y adaptativa. Refiriéndose a sequía a un fenómeno natural vinculado al déficit prolongado de precipitaciones, mientras que el término escasez hace referencia a situaciones operativas y de cumplimiento de demandas. En este contexto, actualmente los Planes Especiales de Sequía (PES) en España utilizan los sistemas de indicadores separados, permitiendo así una mejor anticipación y una respuesta más eficaz frente a las distintas realidades hidrológicas.

Es importante mencionar que, en cumplimiento con las directrices nacionales y europeas, los Planes Especiales de Sequía en España recogen entre sus líneas de acción estratégicas la mejora continua de los sistemas de indicadores de sequía prolongada y escasez, así como el desarrollo de modelos de previsión de estos indicadores a corto y medio plazo. Esta orientación, alineada con la Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética y las Orientaciones Estratégicas sobre Agua y Cambio Climático, refuerza la importancia de incorporar la previsión de los indicadores de sequía en los informes periódicos de seguimiento. De este modo, se avanza hacia una gestión más preventiva y adaptativa, facilitando la toma de decisiones ante escenarios de sequía cada vez más frecuentes e intensos.

### 3.3.1 Gestión de sequía en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Siguiendo la evolución de la gestión nacional y las directrices europeas, la Confederación Hidrográfica del Júcar ha elaborado y actualizado su Plan Especial de Sequía (PES), que constituye el principal instrumento de gestión frente a los escenarios de sequía y escasez coyuntural. Hasta la presente fecha, en la Demarcación Hidrográfica del Júcar se han aprobado dos planes: el primer PES, en 2007, se centraba en un único sistema de indicadores orientado a la detección y gestión de la sequía prolongada.

Sin embargo, la experiencia y los avances en la planificación hidrológica han llevado a que el PES de 2018 diferencie los sistemas de indicadores, tanto para la sequía como para la escasez. De este modo, el plan actual se apoya en un conjunto de indicadores objetivos que permiten distinguir si el sistema se encuentra en situación de sequía prolongada o de escasez coyuntural (normalidad, prealerta, alerta y emergencia) y activar medidas adaptadas a cada situación.

A lo largo de los últimos años, la DHJ ha afrontado varios episodios de sequía, lo que ha motivado la adopción de medidas, las más relevantes se incluyen la reducción temporal de dotaciones para distintos usos, la modificación de criterios de prioridad y asignación de recursos, la adaptación del régimen de explotación de embalses y acuíferos, la promoción del uso de recursos alternativos y la realización de obras de emergencia.

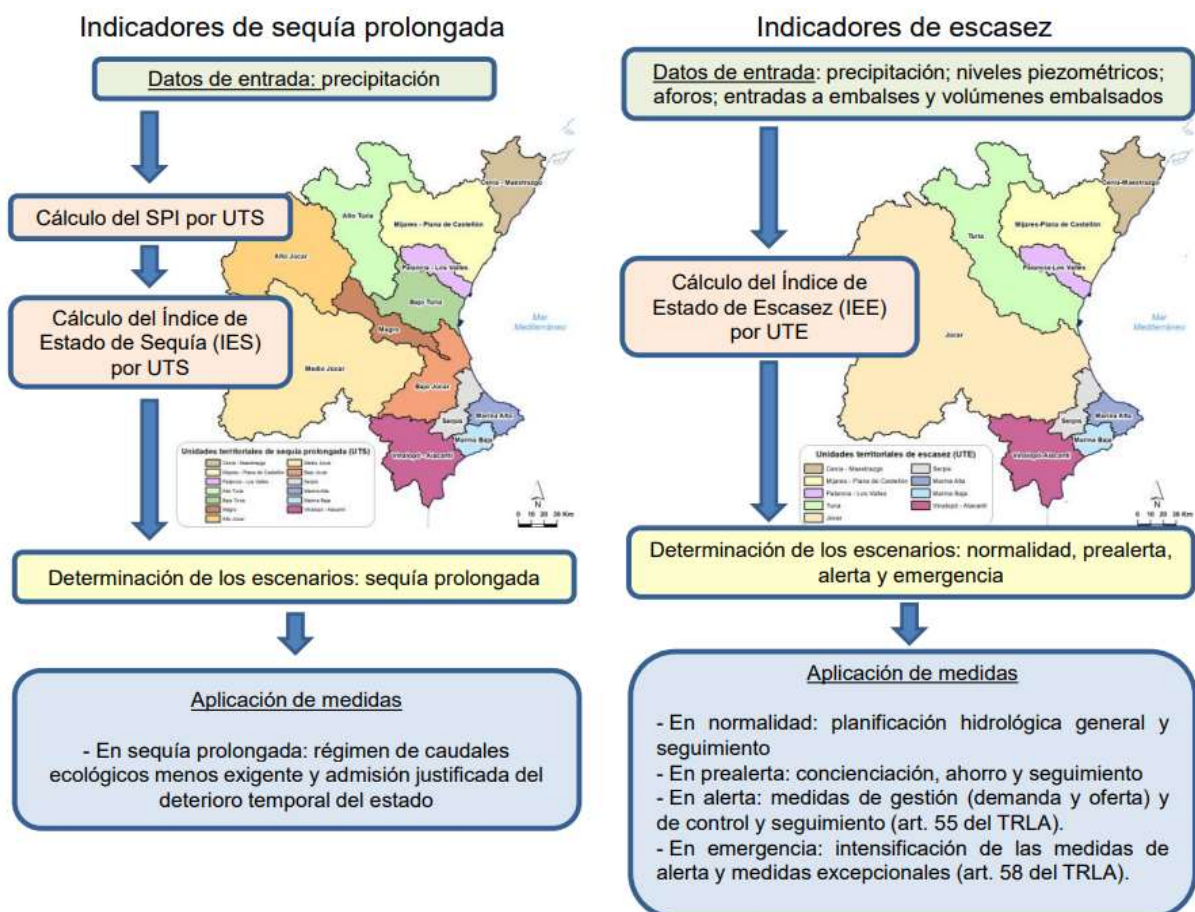
La Demarcación Hidrográfica del Júcar ha implantado un doble sistema de indicadores que permite diagnosticar de forma diferenciada la sequía prolongada y la escasez coyuntural.

- ♦ Para la sequía prolongada, el sistema se basa exclusivamente en datos de precipitación recogidos en 47 pluviómetros puntuales, distribuidos entre las 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS). A partir de estos datos se calcula el SPI y el Índice de Estado de Sequía (IES), lo que permite identificar este escenario y activar medidas específicas, como el ajuste del régimen de caudales ecológicos y la gestión del deterioro temporal del estado de las masas de agua.
- ♦ Para la escasez, el sistema utiliza 40 indicadores seleccionados que integran variables como precipitación, niveles piezométricos, aforos, entradas a embalses y volúmenes embalsados. El cálculo del Índice de Estado de Escasez

(IEE) se realiza en 9 Unidades Territoriales de Escasez (UTE), permitiendo clasificar la situación en los escenarios de normalidad, prealerta, alerta y emergencia, y activar medidas progresivas de gestión, desde el seguimiento y el ahorro hasta la aplicación de medidas excepcionales.

La figura 3 resume de manera esquemática el funcionamiento del sistema de indicadores implantado en la Demarcación Hidrográfica del Júcar para la gestión de la sequía prolongada y la escasez coyuntural. En ella se ilustran las principales fuentes de datos utilizadas, el proceso de cálculo de los índices respectivos y la determinación de los diferentes escenarios de gestión, así como las medidas asociadas a cada uno de ellos. Es importante destacar que las unidades territoriales empleadas para el seguimiento de la sequía prolongada y la escasez coyuntural presentan una diferenciación geográfica, es decir, no coinciden en su delimitación, cada una responde a criterios y necesidades específicas de diagnóstico y gestión. Esta representación visual permite comprender de forma integral y comparativa las diferencias metodológicas, operativas y territoriales entre ambos tipos de indicadores.

Figura 3. Doble sistema de indicadores de sequía (CHJ,2018).

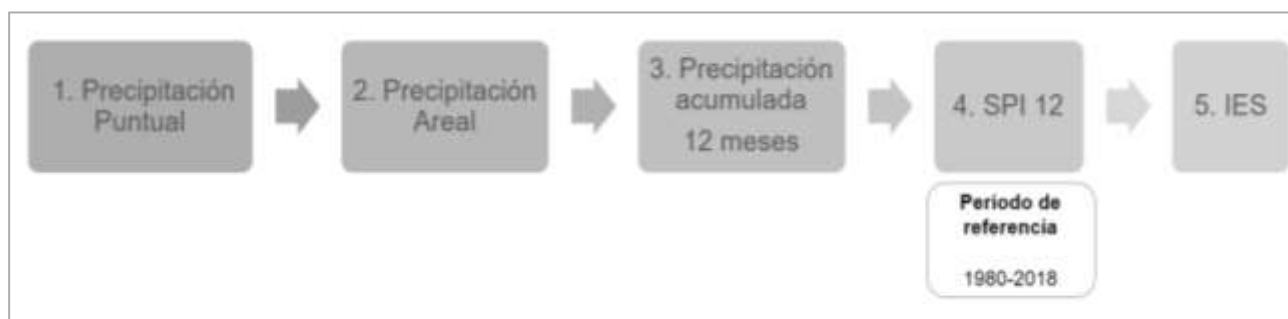


### 3.3.2 Índice de estado de sequía prolongada definido por la Confederación Hidrográfica del Júcar

La Confederación Hidrográfica del Júcar en el Plan Especial de Sequía vigente desde 2018, establece la metodología general utilizada para analizar los indicadores de sequía prolongada en las 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), define que la variable utilizada para detectar situaciones de sequía prolongada es la precipitación, mediante el Índice de Precipitación Estandarizada, acumulado a 12 meses (SPI- 12).

En la figura 4, se observa un esquema metodológico de la obtención del Índice de Estado de Sequía Prolongada.

Figura 4. Metodología establecida por la CHJ.



El análisis de sequía prolongada inicia con la recopilación de precipitación puntual en cada UTS, obtenidos de los pluviómetros puntuales del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). Cada pluviómetro tiene asignado un coeficiente de ponderación (Tabla 2), que permite calcular la precipitación media ponderada para cada UTS. Este procedimiento garantiza que cualquier persona interesada pueda acceder a los datos y replicar el análisis de manera consistente.

Tabla 2. Pluviómetros o estación meteorológica por cada UTS (CHJ, 2028).

| Código UTS | Nombre UTS                 | Nº | Código pluviómetro | Nombre pluviómetro o estación meteorológica | Coef. |
|------------|----------------------------|----|--------------------|---------------------------------------------|-------|
| 1          | Cenia-Maestrazgo           | 1  | N1E0101            | Embalse de Uldecona                         | 0,20  |
|            |                            | 2  | N1P0301            | Pluviómetro de Xert                         | 0,20  |
|            |                            | 3  | N1P0201            | Pluviómetro de Catí                         | 0,20  |
|            |                            | 4  | N1P0501            | Pluviómetro de Alcalá de Chivert            | 0,40  |
| 2          | Mijares-Plana de Castellón | 5  | N1P0601            | Pluviómetro de Benafigos                    | 0,25  |
|            |                            | 6  | N2P0201            | Pluviómetro de Valbona                      | 0,25  |
|            |                            | 7  | N2E0201            | Embalse de Arenós                           | 0,25  |
|            |                            | 8  | N1E0701            | Azud Santa Quiteria                         | 0,25  |
| 3          |                            | 9  | N0P0701            | Pluviómetro de El Toro                      | 0,33  |

|    |                         |    |         |                                       |      |
|----|-------------------------|----|---------|---------------------------------------|------|
|    | Palancia-<br>Los Valles | 10 | N0E0101 | Embalse de Regajo                     | 0,33 |
|    |                         | 11 | NOL0101 | Cabecera acequia Mayor Sagunto        | 0,33 |
| 4A | Alto Turia              | 12 | N3A0101 | Aforo en Villalba Alta                | 0,25 |
|    |                         | 13 | N3E0101 | Embalse de Arquillo de San Blas       | 0,25 |
|    |                         | 14 | N3A0201 | Aforo en Tramacastilla                | 0,25 |
|    |                         | 15 | N6P0201 | Pluviómetro de Remedio de Chelva      | 0,25 |
| 4B | Alto Turia              | 16 | N0P0401 | Pluviómetro de Andilla                | 0,30 |
|    |                         | 17 | N6E0301 | Embalse de Buseo                      | 0,10 |
|    |                         | 18 | N0O0301 | Marco en río Turia                    | 0,30 |
|    |                         | 19 | N0S0101 | Pluviómetro de Valencia               | 0,30 |
| 5A | Magro                   | 20 | N6P0101 | Pluviómetro de Algimia                | 0,33 |
|    |                         | 21 | N7P0101 | Pluviómetro de Caudete de las Fuentes | 0,33 |
|    |                         | 22 | N7P1201 | Pluviómetro de Siete Aguas            | 0,33 |
| 5B | Alto Júcar              | 23 | N4A0101 | Aforo en Cuenca                       | 0,33 |
|    |                         | 24 | N5N0101 | Pluvionivímetro Laguna del Marquesado | 0,20 |
|    |                         | 25 | N5A0101 | Aforo en Pajaroncillo                 | 0,40 |
|    |                         | 26 | N4L0101 | Pluviómetro de Belmontejo             | 0,10 |
| 5C | Medio Júcar             | 27 | N7P0201 | Pluviómetro de Villamalea             | 0,35 |
|    |                         | 28 | N7P0301 | Pluviómetro de la Roda                | 0,15 |
|    |                         | 29 | N7P0501 | Pluviómetro de Ayora La Hunde         | 0,15 |
|    |                         | 30 | N7L0101 | Aforo Trasvase Tajo-Segura            | 0,35 |
| 5D | Bajo Júcar              | 31 | NOL0201 | Canal Júcar-Turia en Picassent        | 0,25 |
|    |                         | 32 | N7A0201 | Aforo en Huerto Mulet                 | 0,25 |
|    |                         | 33 | N7O0401 | Marco en río Albaida                  | 0,25 |
|    |                         | 34 | N7P1501 | Pluviómetro Serra Grossa              | 0,25 |
| 6  | Serpis                  | 35 | N9O0301 | Marco en río Vernissa                 | 0,40 |
|    |                         | 36 | N9S0101 | Pluviómetro de Beniarrés              | 0,20 |
|    |                         | 37 | N9P0101 | Pluviómetro de Alcoi                  | 0,40 |
| 7  | Marina Alta             | 38 | N9O0201 | Marco en rambla Gallinera             | 0,20 |
|    |                         | 39 | N9O0101 | Marco en el embalse de Isbert         | 0,45 |
|    |                         | 40 | N9P0201 | Pluviómetro de Alcalalí               | 0,35 |
| 8  | Marina Baja             | 41 | N8P0601 | Pluviómetro de Abdet                  | 0,25 |
|    |                         | 42 | N8L0101 | Aforo en Sistema Marina Baixa         | 0,35 |
|    |                         | 43 | N8S0101 | Pluviómetro de Amadorio               | 0,40 |
| 9  | Vinalopó-Alacantí       | 44 | N8P0201 | Pluviómetro de Benejama               | 0,25 |
|    |                         | 45 | N8O0101 | Marco en embalse de Tibi              | 0,25 |
|    |                         | 46 | N8O0201 | Marco en Elda                         | 0,25 |
|    |                         | 47 | N8P0501 | Pluviómetro de Alacant                | 0,25 |

De igual manera, en la figura 5, se muestra la ubicación geográfica de los pluviómetros correspondientes a cada Unidad Territorial de Sequía.

Figura 5. Ubicación de los pluviómetros puntuales del SAIH para cada UTS.



Una vez obtenida la precipitación puntual, se establece que la variable de análisis será evaluada utilizando una acumulación de 12 meses, con el objetivo de disminuir las fluctuaciones mensuales e identificar patrones de precipitación a largo plazo.

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), desarrollado por McKee et al. (1993), se calcula ajustando primero los datos de precipitación acumulada a una distribución de probabilidad. Posteriormente, esta distribución se transforma en una distribución normal estándar, de forma que la media de los datos sea cero y la desviación estándar uno para el período y la localidad evaluados. En la Confederación Hidrográfica del Júcar, el ajuste se realiza utilizando una distribución Log-Normal, es decir, aplicando una transformación logarítmica a los datos de precipitación mensual. Tanto el promedio como la desviación estándar se calculan sobre la serie de referencia establecida (1980-2018).

La fórmula utilizada para calcular el SPI es la siguiente (CHJ, 2018):

$$SPI_{12} = \frac{\ln(P12_{x,y} + 1) - \text{promedio} (\ln(P12_x + 1))}{\text{Desvst} (\ln(P12_x + 1))}$$

(Ecuación 1)

Nota. Reproducido de Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2018).

Donde:

$SPI_{x,y}$ : Valor de precipitación estandarizada.

$P_{12\ x,Y}$ : Precipitación acumulada a 12 meses en el mes “X” y año “Y”.

$P_x$ : Precipitación acumulada a 12 meses en el mes “X” de la serie de referencia.

Una vez obtenido los valores de SPI 12, es necesario calcular el percentil 2, 10, 50 y 98 de la serie de referencia. Dado que según lo establecido en el PES 2018, se determinó de manera conjunta para todas las UTS que el umbral de sequía prolongada corresponde al percentil 10 de la serie de referencia.

El cálculo del Índice de Estado de Sequía Prolongada es el escalado del SPI 12 a valores adimensionales entre 0 y 1, para lo cual se aplica los siguientes condicionantes:

Primer tramo, (entre 0 y umbral de sequía prolongada 0.3):

$$\text{Si } V_i < V_{p10} \text{ entonces } I_e = 0 + \frac{(0.3 - 0)}{V_{p10} - V_{p2}} * (V_i - V_{p2})$$

(Ecuación 2)

Segundo tramo, (entre 0.3 y umbral de sequía prolongada 0.5):

$$\text{Si } V_{p10} \leq V_i < V_{med} \text{ entonces } I_e = 0.3 + \frac{(0.5 - 0.3)}{V_{med} - V_{p10}} * (V_i - V_{p10})$$

(Ecuación 3)

Primer tramo, (entre 0.5 y umbral de sequía prolongada 1):

$$\text{Si } V_i \geq V_{med} \text{ entonces } I_e = 0.5 + \frac{(1 - 0.5)}{V_{p98} - V_{med}} * (V_i - V_{med})$$

(Ecuación 4)

Donde:

$V_i$ : Mes de cálculo.

$V_{p98}$ : Percentil 98 de la serie de referencia (Valor máximo).

$V_{med}$ : Percentil 50 de la serie de referencia.

$V_{p10}$ : Percentil 10 de la serie de referencia (Umbral).

$V_{p2}$ : Percentil 2 de la serie de referencia (Valor mínimo).

*Nota. Reproducido de Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2018).*

En la figura 6 se observa el umbral establecido de 0.3 y el escalado de la serie en base a los percentiles 2, 10, 50 y 98. Los valores que exceden los límites máximo y mínimo se ajustan a 1 y 0, respectivamente, asegurando que el índice permanezca dentro de este rango.

Figura 6. Definición de umbral de Sequía Prolongada (0.3).

Índice de Estado de Sequía Prolongada (CHJ, 2018).



### 3.4 PREDICCIÓN CLIMÁTICA

La predicción climática estacional es una herramienta fundamental para anticipar la evolución de las condiciones meteorológicas a escala global y regional en los próximos meses, generalmente en una ventana temporal de hasta seis meses. Basada en modelos probabilísticos y en el monitoreo de grandes patrones climáticos como El Niño y La Niña, la predicción estacional permite estimar con antelación las tendencias de temperatura y precipitación, y sustenta la emisión de alertas tempranas y la adopción de medidas anticipatorias en sectores sensibles al clima, como la gestión del agua, la agricultura o la reducción del riesgo de desastres (Hagedorn et al., 2005; WMO, 2024).

La capacidad de predicción climática estacional se basa en la combinación de diferentes modelos y métodos estadísticos que aprovechan la información de los principales patrones del clima, como los índices oceánicos y atmosféricos. Además, el uso de varios modelos a la vez permite tener una visión más completa y representa mejor la incertidumbre natural del sistema climático (Bretherton et al., 1992; Krishnamurti et al., 1999; Hagedorn et al., 2005). De esta forma, los pronósticos estacionales ayudan a anticipar posibles anomalías en variables como la temperatura o la precipitación, que se han convertido en una herramienta clave para la toma de decisiones en un contexto de variabilidad y cambio climático.

En el contexto de la predicción climática, se utiliza el término variabilidad climática futura para referirse a los posibles cambios y fluctuaciones en variables como la precipitación y la temperatura que se esperan durante el periodo de un pronóstico. Según la Organización Meteorológica Mundial (2021), existen dos enfoques principales para estimar esta variabilidad:

- ♦ Uso de conjuntos de datos históricos: Consiste en analizar datos meteorológicos pasados, como precipitación, temperatura, temperatura de la superficie del mar y de esta manera identificar patrones similares a los actuales y anticipar la posible evolución del clima.
- ♦ Utilización de ensambles de modelos climáticos: Se basa en generar pronósticos mediante modelos climáticos que simulan diferentes escenarios

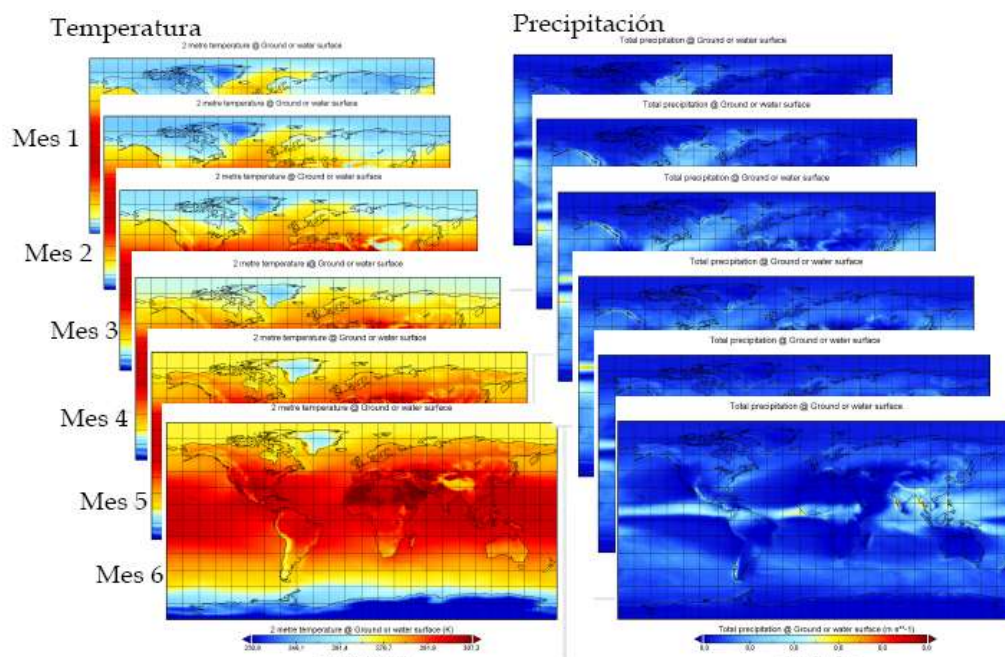
futuros para variables clave como la precipitación, la temperatura y otros parámetros relevantes.

Ambos métodos permiten anticipar la evolución del clima y gestionar la incertidumbre inherente a las predicciones estacionales (WMO, 2021).

Actualmente, existen diferentes centros que elaboran de manera rutinaria la predicción climática estacional a nivel internacional. Estas instituciones emplean modelos climáticos avanzados y técnicas de pronóstico para estimar la evolución futura de variables como la temperatura y la precipitación. Entre los organismos más destacados se encuentran la Organización Meteorológica Mundial (WMO), el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (ECMWF), el Climate Prediction Center de la NOAA en Estados Unidos y el Met Office del Reino Unido.

La figura 7 presenta un ejemplo de predicción climática estacional elaborada por ECMWF-System 5. Este modelo avanzado utiliza conjuntos de datos y 51 simulaciones numéricas para proyectar las anomalías de temperatura y precipitación esperadas durante un periodo de 6 meses. Estas predicciones permiten anticipar tendencias climáticas relevantes para la gestión hídrica, como posibles escenarios de sequía o exceso de lluvias, facilitando así la planificación y toma de decisiones.

*Figura 7. Ejemplo de aplicación de la predicción climática estacional (ECMWF, 2024).*



## 3.5 PREDICCIÓN HIDROLÓGICA

El objetivo de la predicción hidrológica estacional es estimar la evolución futura de variables clave del ciclo hidrológico y así anticipar la disponibilidad del recurso hídrico y reducir riesgos asociados a fenómenos extremos (WMO, 2021; Yuan, Wood, & Ma, 2015).

Según la Organización Meteorológica Mundial (2021), la predicción hidrológica estacional se basa en la combinación de dos fuentes principales de predictibilidad:

- ♦ Condiciones hidrológicas iniciales: que representa el estado de la cuenca al inicio del periodo de pronóstico, estos se pueden obtener mediante parámetros hidrológicos observados (manto de nieve, saturación del suelo, caudal, aguas subterráneas, niveles de embalses, etc.), o mediante los parámetros meteorológicos observados como la precipitación, evapotranspiración y temperatura.
- ♦ Variabilidad climática futura: se refiere a los posibles cambios y fluctuaciones en el periodo predicción, la cual puede obtenerse mediante datos análogos históricos y modelos climáticos.

Estudios recientes han demostrado que la importancia relativa de las condiciones iniciales y de la variabilidad climática futura varía según la región y la estación del año. Las condiciones iniciales suelen dominar la predictibilidad en los primeros meses del pronóstico, mientras que la influencia de la predicción climática aumenta a medida que avanza el periodo de pronóstico (Shukla & Lettenmaier, 2011).

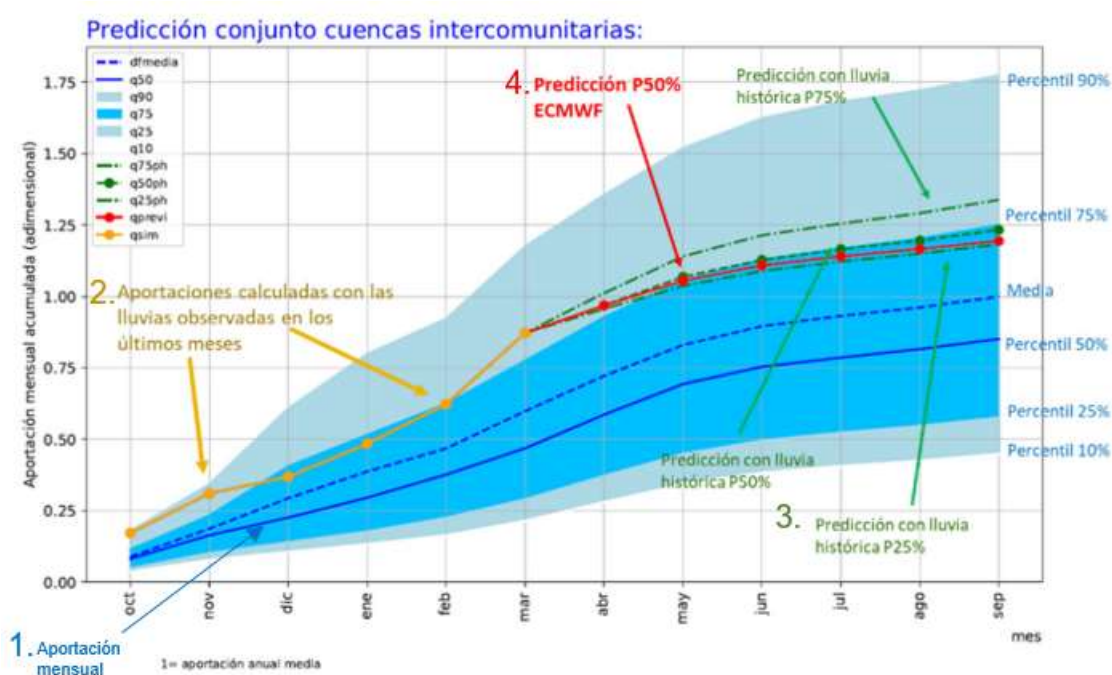
### 3.5.1 Predicción Hidrológica España

En la actualidad, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) implementa la predicción hidrológica estacional en España en tres escalas: nacional, por Demarcaciones Hidrográficas y en puntos de control clave dentro de cada demarcación. Esta herramienta proporciona a los responsables de la gestión del agua información anticipada sobre las aportaciones hídricas previstas para los próximos seis meses y hasta el cierre del año hidrológico, fortaleciendo así la toma de decisiones en la planificación y administración de los recursos hídricos.

El sistema de predicción para las cuencas intercomunitarias, en funcionamiento desde 2023 y con actualizaciones mensuales, se apoya en una metodología desarrollada por el IIAMA-UPV. Este enfoque integra series históricas de precipitación y temperatura de la AEMET, junto con pronósticos climáticos estacionales generados por el modelo ECMWF-System 5 del Centro Europeo de Predicción Climática a Medio Plazo, permitiendo así estimaciones más precisas y adaptadas a diferentes escalas espaciales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO], 2024).

La figura 8 muestra un ejemplo de la predicción hidrológica realizada el mes de marzo 2024, para el conjunto de cuencas intercomunitarias, la cual integra cuatro componentes principales. En primer lugar, la base azul representa los estadísticos de la serie histórica de aportaciones mensuales, mostrando los percentiles 90, 75, 50, 25 y 10, lo que permite visualizar la variabilidad observada en el pasado. En segundo lugar, la línea naranja corresponde a las aportaciones acumuladas calculadas a partir de las lluvias y temperaturas observadas en los últimos meses, estableciendo así la condición inicial para la predicción. A partir de este punto, se aplican dos metodologías de predicción: la línea verde muestra la evolución futura simulada utilizando lluvias y temperaturas históricas, mientras que la línea roja refleja la predicción estacional basada en el modelo ECMWF a seis meses.

Figura 8. Explicativa de los contenidos de la predicción hidrológica para las aportaciones acumuladas (MITECO, 2024).



## 4. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico de este proyecto se estructura en dos componentes interrelacionados, diseñados para evaluar y predecir el estado de sequía prolongada en las Unidades Territoriales de Sequía (UTS).

El bloque 1 es el cálculo del índice de Estado de Sequía Prolongada histórico, el cual se centra en la construcción de la serie histórica del IES, que sirve como base diagnóstica y referencial. Para ello:

- ♦ Se recopilan y homogenizan registros de precipitación representativos de cada UTS, garantizando la consistencia temporal y espacial.
- ♦ Se aplica el algoritmo del IES definido en el Plan Especial de Sequías de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2018), que integra el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y umbrales específicos para identificar escenarios de sequía prolongada y normalidad hidrológica.

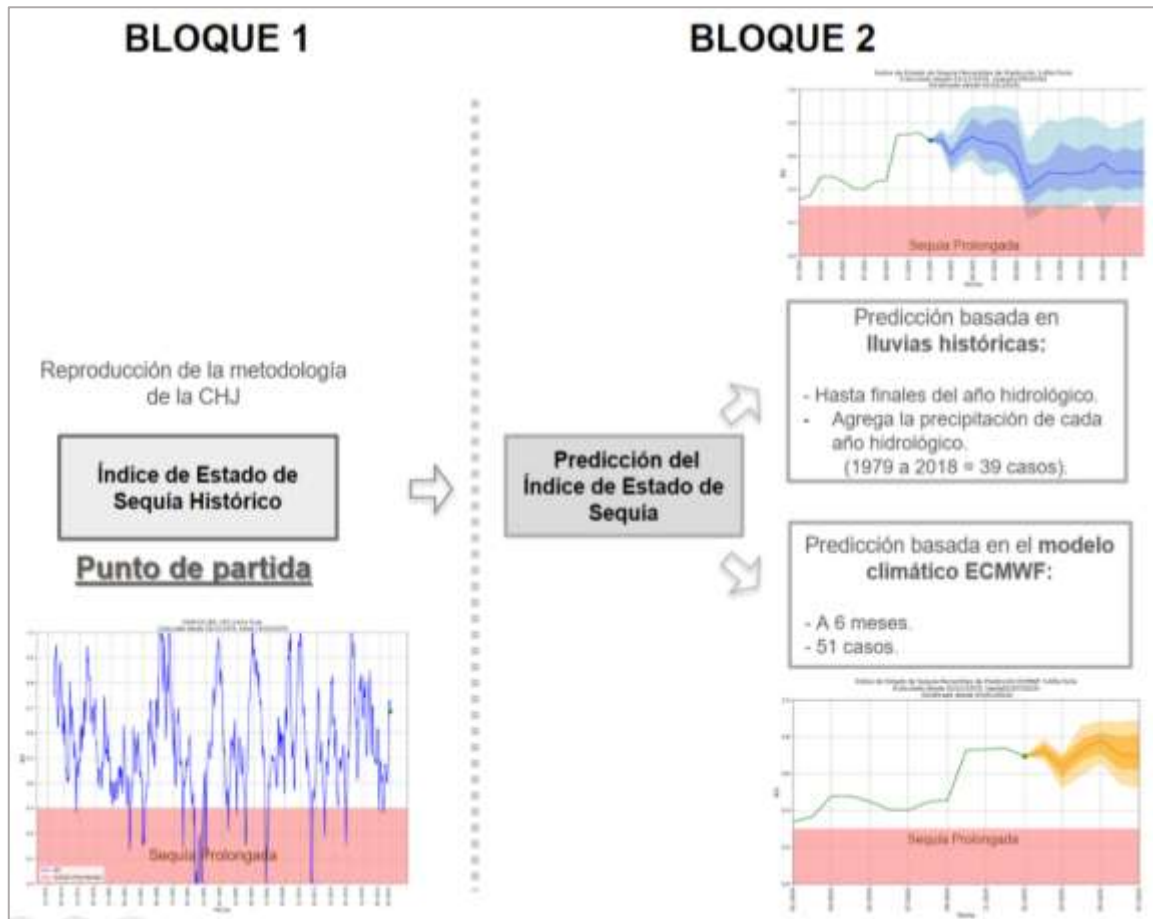
El segundo bloque es la predicción del índice de Estado de Sequía Prolongada, el cual genera proyecciones estacionales mediante dos enfoques complementarios:

- ♦ Pronóstico basado en análogos históricos: Simula la evolución del IES utilizando series de precipitación de años hidrológicos pasados que presentan condiciones análogas a las actuales.
- ♦ Pronóstico climático estacional: Incorpora predicciones probabilísticas de precipitación del modelo SEAS5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), calibradas para las UTS.

El esquema que se muestra en la figura 9, sintetiza visualmente la estructura metodológica aplicada en este proyecto. En él se distinguen claramente los dos bloques principales: el primero, centrado en la reconstrucción y diagnóstico histórico del índice de sequía prolongada, y el segundo, dedicado a la predicción estacional del estado de sequía. El esquema ilustra cómo, a partir del cálculo del índice histórico, se generan las proyecciones utilizando tanto datos de lluvias históricas como predicciones obtenidas del modelo climático ECMWF. Esta representación facilita la

comprensión del flujo de trabajo, las fuentes de información empleadas y la integración de diferentes enfoques predictivos.

Figura 9. Esquema de los bloques metodológicos a implementarse.



Adicionalmente, ambos métodos de predicción se integran en una visualización conjunta que, a partir de la fecha de inicio de la predicción, permite comparar en un mismo gráfico la evolución histórica y los posibles escenarios futuros estimados por cada enfoque. Esta representación facilita la interpretación de los resultados y proporciona una visión más completa del rango de posibles evoluciones del índice de sequía prolongada.

El desarrollo del programa se realizó en Python 3, utilizando Visual Studio Code como entorno de trabajo y diversas librerías especializadas para automatizar el procesamiento de datos, el cálculo estadístico del SPI y del IES, la generación de informes y la visualización de resultados. El sistema está diseñado para calcular el Índice de Estado de Sequía Prolongada aplicando tanto el análisis histórico como la

predicción estacional, abarcando toda la Demarcación Hidrográfica del Júcar mediante sus 13 Unidades Territoriales de Sequía.

Para garantizar la reproducibilidad y actualización del sistema, se integraron módulos para la gestión de datos multidimensionales y la generación automática de reportes. El funcionamiento eficiente del programa depende de una organización basada en archivos de datos y archivos de control, lo que permite automatizar el procesamiento, minimizar errores y facilitar la gestión y el seguimiento de la sequía prolongada en las distintas unidades territoriales.

## 5. RESULTADOS

La sección de resultados se organiza en tres apartados principales que permiten una visión integral del comportamiento de los indicadores de sequía y de la eficacia de las predicciones realizadas. En primer lugar, se muestra la estructura general del programa Python, como los datos de entrada y los archivos de control utilizados para un correcto funcionamiento. En segundo lugar, se presentan los indicadores de sequía históricos, donde se analiza la evolución temporal del índice de sequía prolongada a partir de los registros disponibles. Finalmente, se muestra la predicción de los indicadores de sequía utilizando dos enfoques: la predicción basada en datos meteorológicos históricos y la predicción fundamentada en las proyecciones climáticas del modelo ECMWF.

Todo el análisis se ilustra con el caso práctico de la Unidad Territorial Alto Turia, seleccionada como ejemplo representativo del enfoque desarrollado.

## 5.1 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA PYTHON

El programa desarrollado para este proyecto está diseñado para calcular el Índice de Estado de Sequía Prolongada, aplicando los dos bloques metodológicos definidos: el análisis histórico y la predicción estacional. El cálculo se lleva a cabo para toda la extensión de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, considerando sus 13 Unidades Territoriales de Sequía.

El funcionamiento adecuado del programa depende de la utilización de archivos de datos y archivos de control. Esta organización permite automatizar el procesamiento de los datos, minimizando la posibilidad de errores y facilitando la gestión del sistema.

### 5.1.1 Archivos de entrada

Los archivos de datos constituyen la base de datos fundamental para el procesamiento y análisis del programa. Estos archivos contienen la información correspondiente a las Unidades Territoriales de Sequía y los registros de precipitación mensual. Como se muestra en la figura 10, en este proyecto se utilizan tres archivos de datos principales.

*Figura 10. Archivos de entrada para el programa PYTHON.*

|                                                                                                                           |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|  06uts.dat                             | Archivo DAT |
|  utsjucar_pre_salreg_hist.asc          | Archivo ASC |
|  utsjucar_pre_salreg_ecmwf_members.asc | Archivo ASC |

El primero de ellos es el archivo de entrada denominado "06uts.dat", que contiene la información general de las Unidades Territoriales de Sequía. La estructura de este archivo se muestra en la Tabla 3.

*Tabla 3. Estructura del archivo de entrada "06uts.dat".*

| Coordenada X | Coordenada Y | UTS | Nombre Corto               | Nombre Largo               |
|--------------|--------------|-----|----------------------------|----------------------------|
| 1000         | 2000         | 11  | Cenia-Maestrazgo           | Cenia-Maestrazgo           |
| 1000         | 2000         | 5   | Mijares-Plana-de-Castellón | Mijares-Plana-de-Castellón |

|      |      |    |                     |                     |
|------|------|----|---------------------|---------------------|
| 1000 | 2000 | 6  | Palancia-Los-Valles | Palancia-Los-Valles |
| 1000 | 2000 | 3  | Alto-Turia          | Alto-Turia          |
| 1000 | 2000 | 4  | Bajo-Turia          | Bajo-Turia          |
| 1000 | 2000 | 2  | Alto-Júcar          | Alto-Júcar          |
| 1000 | 2000 | 1  | Medio-Júcar         | Medio-Júcar         |
| 1000 | 2000 | 12 | Magro               | Magro               |
| 1000 | 2000 | 13 | Bajo-Júcar          | Bajo-Júcar          |
| 1000 | 2000 | 7  | Serpis              | Serpis              |
| 1000 | 2000 | 8  | Marina-Alta         | Marina-Alta         |
| 1000 | 2000 | 9  | Marina-Baja         | Marina-Baja         |
| 1000 | 2000 | 10 | Vinalopó-Alacantí   | Vinalopó-Alacantí   |

*Donde:*

*Coordenada X, Coordenada Y: Localización espacial del punto de control (UTS).*

*UTS: Código identificador de la Unidad Territorial de Sequía.*

*Nombre Corto, Nombre Largo: Denominación de la UTS.*

El segundo archivo, denominado "utsjucar\_pre\_salreg\_hist.asc", recopila los datos históricos de precipitación mensual para cada Unidad Territorial de Sequía. Este archivo es fundamental para los dos bloques metodológicos y presenta la siguiente estructura de columnas:

*Tabla 4. Estructura del archivo de datos "utsjucar\_pre\_salreg\_hist.asc".*

| UTS | Año | Mes | Precipitación Mensual (mm) | Superficie UTS |
|-----|-----|-----|----------------------------|----------------|
|-----|-----|-----|----------------------------|----------------|

*Donde:*

*UTS: Código identificador de la Unidad Territorial de Sequía.*

*Año: Año del registro.*

*Mes: Mes del registro.*

*Precipitación Mensual (mm): Valor de precipitación mensual en milímetros.*

*Superficie UTS: Superficie de la UTS.*

El tercer archivo, denominado "utsjucar\_pre\_salreg\_ecmwf\_members.asc", contiene la información extraída del portal del Centro Europeo de Predicción (ECMWF). Este archivo recopila los 51 escenarios de predicción de precipitación mensual generados por el modelo climático estacional.

Cabe destacar que la descarga de estos datos se realiza por año hidrológico, por lo que los valores de predicción corresponden a los seis meses posteriores al mes actual (por ejemplo, a partir de enero de 2025). La estructura de las columnas del archivo es la siguiente:

Tabla 5. Estructura del archivo de datos "utsjucar\_pre\_salreg\_ecmwf\_members.asc".

| Caso de predicción | UTS  | Año  | Mes  | Precipitación mensual (mm) |
|--------------------|------|------|------|----------------------------|
| 1                  | 1    | 2024 | 10   | 85.684                     |
| 1                  | 1    | 2024 | 11   | 9.619                      |
| 1                  | 1    | 2024 | 12   | 5.056                      |
| 1                  | 1    | 2025 | 1    | 15.527                     |
| 1                  | 1    | 2025 | 2    | 60.602                     |
| 1                  | 1    | 2025 | 3    | 58.24                      |
| 1                  | 1    | 2025 | 4    | 16.269                     |
| 1                  | 1    | 2025 | 5    | 106.521                    |
| 1                  | 1    | 2025 | 6    | 86.775                     |
| 1                  | 1    | 2025 | 7    | 4.18                       |
| 1                  | 1    | 2025 | 8    | 8.188                      |
| 1                  | 1    | 2025 | 9    | 29.536                     |
| 1                  | 2    | 2024 | 10   | 145.539                    |
| 1                  | 2    | 2024 | 11   | 19.982                     |
| 1                  | 2    | 2024 | 12   | 11.911                     |
| 1                  | 2    | 2025 | 1    | 54.26                      |
| 1                  | 2    | 2025 | 2    | 76.71                      |
| 1                  | 2    | 2025 | 3    | 57.011                     |
| 1                  | 2    | 2025 | 4    | 27.825                     |
| 1                  | 2    | 2025 | 5    | 110.521                    |
| 1                  | 2    | 2025 | 6    | 152.343                    |
| 1                  | 2    | 2025 | 7    | 3.376                      |
| 1                  | 2    | 2025 | 8    | 13.483                     |
| 1                  | 2    | 2025 | 9    | 36.9                       |
| ....               | .... | .... | .... | ...                        |
| 51                 | 13   | 2025 | 9    | ...                        |

Donde:

Caso de predicción: Identificador del conjunto de predicción (de 1 a 51).

UTS: Código identificador de la Unidad Territorial de Sequía.

Año: Año del registro.

Mes: Mes del registro.

Precipitación Mensual (mm): Valor de precipitación mensual en milímetros.

### 5.1.2 Archivo de control

Los archivos de control contienen los parámetros y configuraciones necesarios para guiar la ejecución del código. Su propósito es centralizar los ajustes del programa, de modo que cualquier modificación pueda realizarse únicamente en estos

archivos, facilitando así la gestión y minimizando posibles errores en la operación del sistema.

El archivo de control, denominado "04datuts", recopila todas las directrices necesarias para la ejecución del programa y actúa como archivo principal de configuración. En el cual se especifican los archivos de entrada, los periodos de análisis, los parámetros metodológicos y los nombres de los archivos de salida, entre otros aspectos relevantes. De este modo, se centraliza la gestión y se facilita la modificación de cualquier parámetro sin necesidad de acceder al código fuente.

A continuación, se describen las principales secciones y parámetros contenidos en este archivo. En la tabla 6 se muestran la selección de los archivos de entrada para el correcto funcionamiento del programa.

*Tabla 6. Parámetros generales del programa en el archivo de control 04datuts.*

| Descripción                                       | Comando                               |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Archivo base de información de las UTS            | 06uts.dat                             |
| Archivo base de datos histórico                   | utsjucar_pre_salreg_hist.asc          |
| Archivo con las predicciones climáticas del ECMWF | utsjucar_pre_salreg_ecmwf_members.asc |

En la tabla 7 se indica que parámetros son necesarios establecer para que se ejecute de forma adecuada el Bloque Metodológico 1.

*Tabla 7. Parámetros correspondientes al Bloque metodológico 1 definidos en el archivo "04datuts".*

| Descripción                                                            | Comando                              |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Periodo de cálculo                                                     | Fecha de inicio y fin de cálculo     |
| Periodo de referencia                                                  | Fecha de inicio y fin de referencia  |
| Nombre del PDF de resultados de gráficos estadísticos medios mensuales | 01_estadis_medio_mensual.pdf         |
| Nombre del PDF de resultados de gráficos de cálculo del IES histórico  | 02_serie_hist_indicadores_sequia.pdf |

De igual manera, la tabla 8 muestra los comandos necesarios para la ejecución del Bloque Metodológico 2.

*Tabla 8. Parámetros correspondientes al Bloque metodológico 2 definidos en el archivo "04datuts".*

| Descripción                                                                                       | Comando                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Periodo de casos de predicción histórica                                                          | Fecha de inicio y fin para casos de predicción histórica |
| Nombre del PDF de resultados de gráficos de cálculo del IES de la predicción con datos históricos | 03_prediccion_hist_indicadores_sequia.pdf                |
| Número de meses de predicción con datos del ECMWF                                                 | 6                                                        |
| Número de casos de predicción del ECMWF                                                           | 51                                                       |
| Nombre del PDF de resultados de gráficos de cálculo del IES de la predicción con datos del ECMWF  | 04_prediccion_ecmwf_indicadores_sequia.pdf               |

### 5.1.3 Lectura de datos

La lectura de datos inicia a partir del archivo de control "04datuts", el cual especifica las rutas y nombres de los archivos de entrada necesarios para el análisis. Estos archivos son: "06uts.dat" (información base de las Unidades Territoriales de Sequía), "utsjucar\_pre\_salreg\_hist.asc" (base de datos histórica de precipitación) y "utsjucar\_pre\_salreg\_ecmwf\_members.asc" (predicciones climáticas del ECMWF).

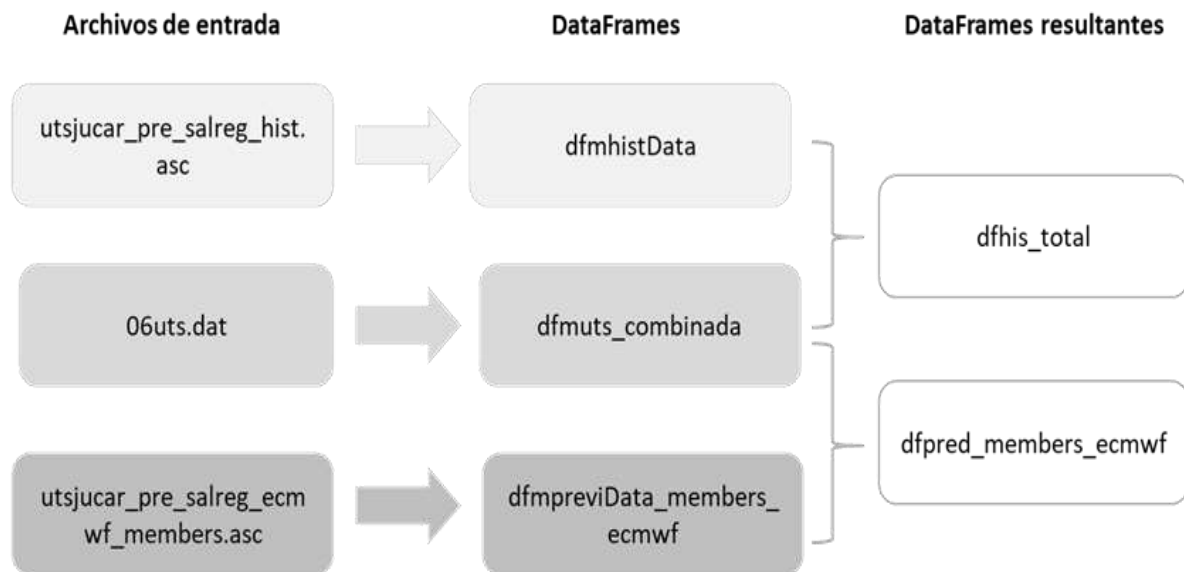
El programa accede a estos archivos y carga su contenido en la memoria para su posterior procesamiento.

### 5.1.4 Procesamiento de datos

Una vez realizada la lectura de los archivos, es importante establecer el formato y la estructura adecuada de los datos. Para ello, primero se almacenan los datos en listas, luego se organizan en matrices y finalmente, se transforman en DataFrames. Esta conversión facilita la manipulación y la visualización de la información durante la programación.

Posteriormente, se realizó la unión de los DataFrames “dfmhistData” y “dfmuts\_combinada” utilizando los códigos de UTS como clave, generando el DataFrame “dfhis\_total”. De forma similar, se unieron los DataFrames “dfmpreviData\_members\_ecmwf” y “dfmuts\_combinada” para crear el DataFrame “dfpred\_members\_ecmwf”. El diagrama que se presenta a continuación resume visualmente este proceso.

*Figura 11. Diagrama representativo del procesamiento de datos.*



Los DataFrames resultantes (dfhis\_total y dfpred\_members\_ecmwf) contienen la información combinada de los datos históricos y de predicción, junto con la información geográfica y descriptiva de cada UTS. Estos DataFrames sirven como base para los análisis posteriores.

### 5.1.5 Archivo eco de comprobación

El programa genera automáticamente un archivo eco de comprobación, que funciona como un registro detallado de la ejecución del proceso. Este archivo, comúnmente denominado “eco”, actúa como una “impresora” virtual que documenta cada paso relevante realizado por el programa, incluyendo los archivos de entrada y los periodos de análisis.

El objetivo principal de este archivo es facilitar la comprobación de que el programa se ha ejecutado correctamente y con los parámetros deseados, permitiendo al usuario revisar de manera rápida y clara los detalles de cada ejecución. Además, este registro

es fundamental para la detección de posibles errores, la validación de resultados y la replicabilidad del análisis.

En la Figura 12 se muestra el contenido del archivo eco generado por el programa.

Figura 12. Archivo eco generado por PYTHON.

```

#####
ARCHIVO DE ECO DE COMPROBACION

VARIABLE A ANALIZAR:Precipitaciones por UTS
#####

El archivo de control (del que se toma la informacion de las uts):
06uts.dat

Los puntos de control, es decir UTS son:
Numero de puntos de control:
13

#####
Archivo con los datos historicos:
utsjucar_pre_salreg_hist.asc

Numero de filas del archivo:
8580

Archivos con los resultados de la prediccion del Centro Europeo ECMWF:
utsjucar_pre_salreg_ecmwf_members.asc

Numero de filas del archivo:
7956

#####
Periodo de calculo de IES histórico:
(1970,11,1) al (2025,03,1)
Periodo de referencia para promedio y desviacion estandar MEAN Y STD: DE
(1979,11,1) al (2018,9,1)
Periodo para generar members de predicción histórica IES: DE
(1979,11,1) al (2018,9,1)
#####

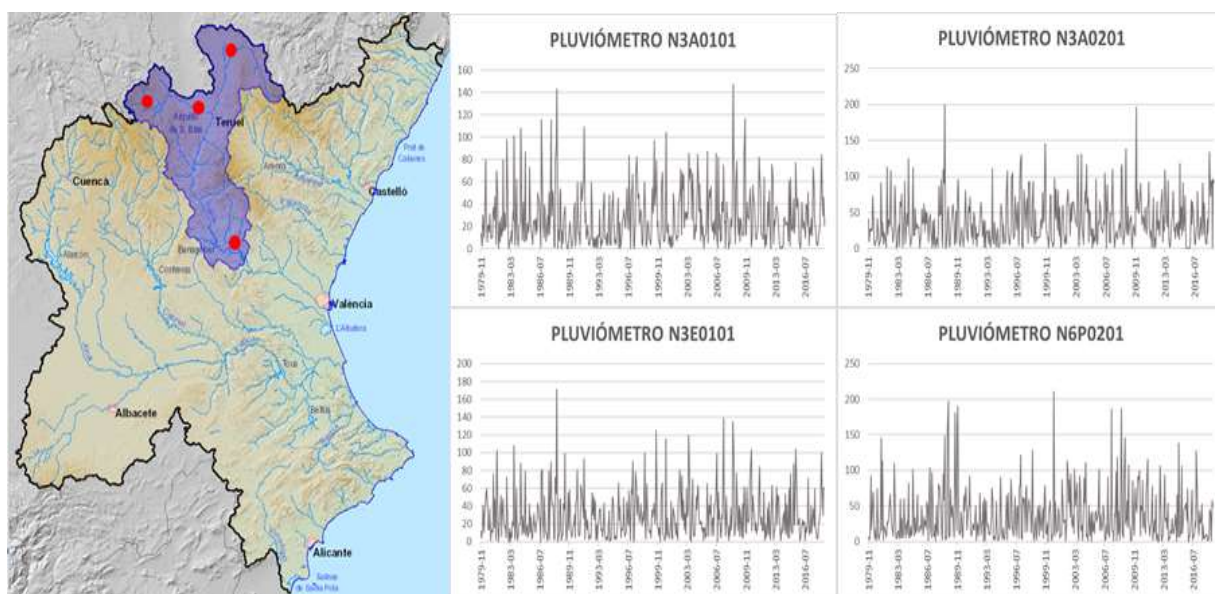
```

## 5.2BLOQUE 1: ÍNDICE DE ESTADO SEQUÍA PROLONGADA HISTÓRICA

Para el Índice de Estado de Sequía Histórica, es necesario definir el periodo de cálculo, ya que el periodo de referencia ha sido previamente establecido por la Confederación Hidrográfica del Júcar (noviembre 1979 septiembre de 2018).

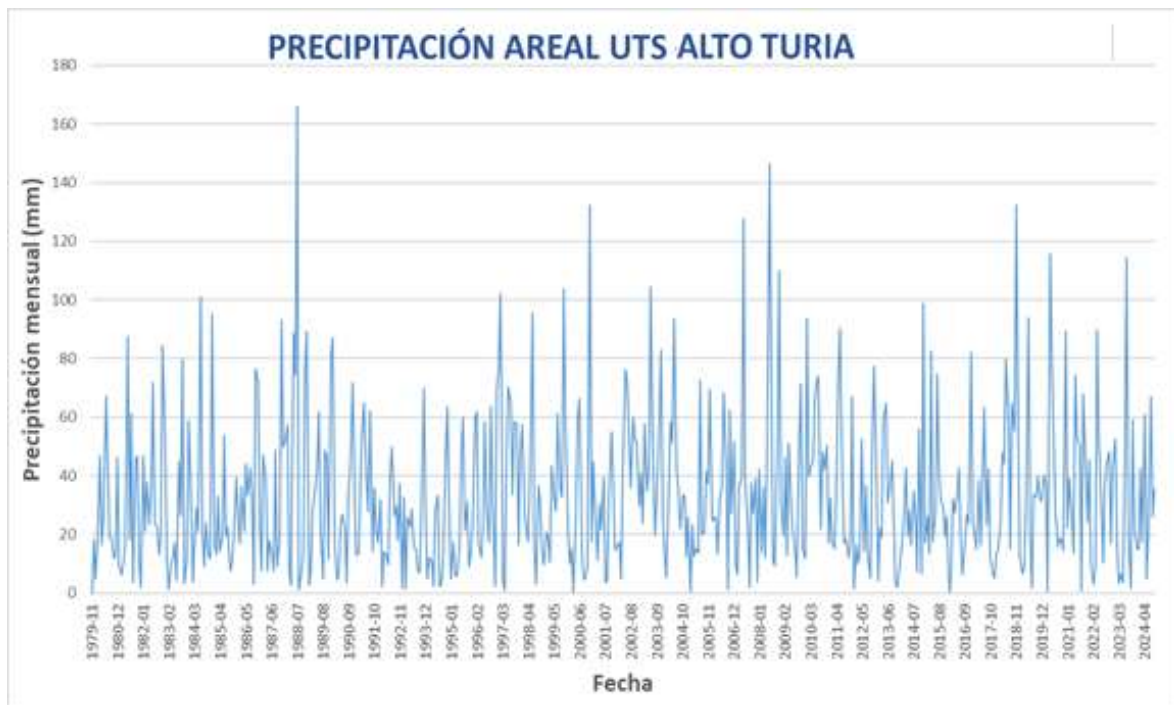
En este apartado, el análisis histórico se realiza desde noviembre de 1979 hasta enero de 2024. Los datos de precipitación mensual son provenientes de los pluviómetros puntuales del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), como se indica en la figura 13 en la UTS Alto Turia existen 4 pluviómetros los cuales tienen ponderación de 0.25 cada una.

Figura 13. Ubicación de los pluviómetros UTS Alto Turia.



Con la ponderación respectiva a cada pluviómetro se obtiene la serie histórica de precipitación areal de la UTS Alto Turia como se muestra en la figura 14, la cual es el dato de partida para realizar el programa en PYTHON.

Figura 14. Precipitación Areal UTS Alto Turia 1975-2024.



### 5.2.1 Estadísticos mensuales de precipitación

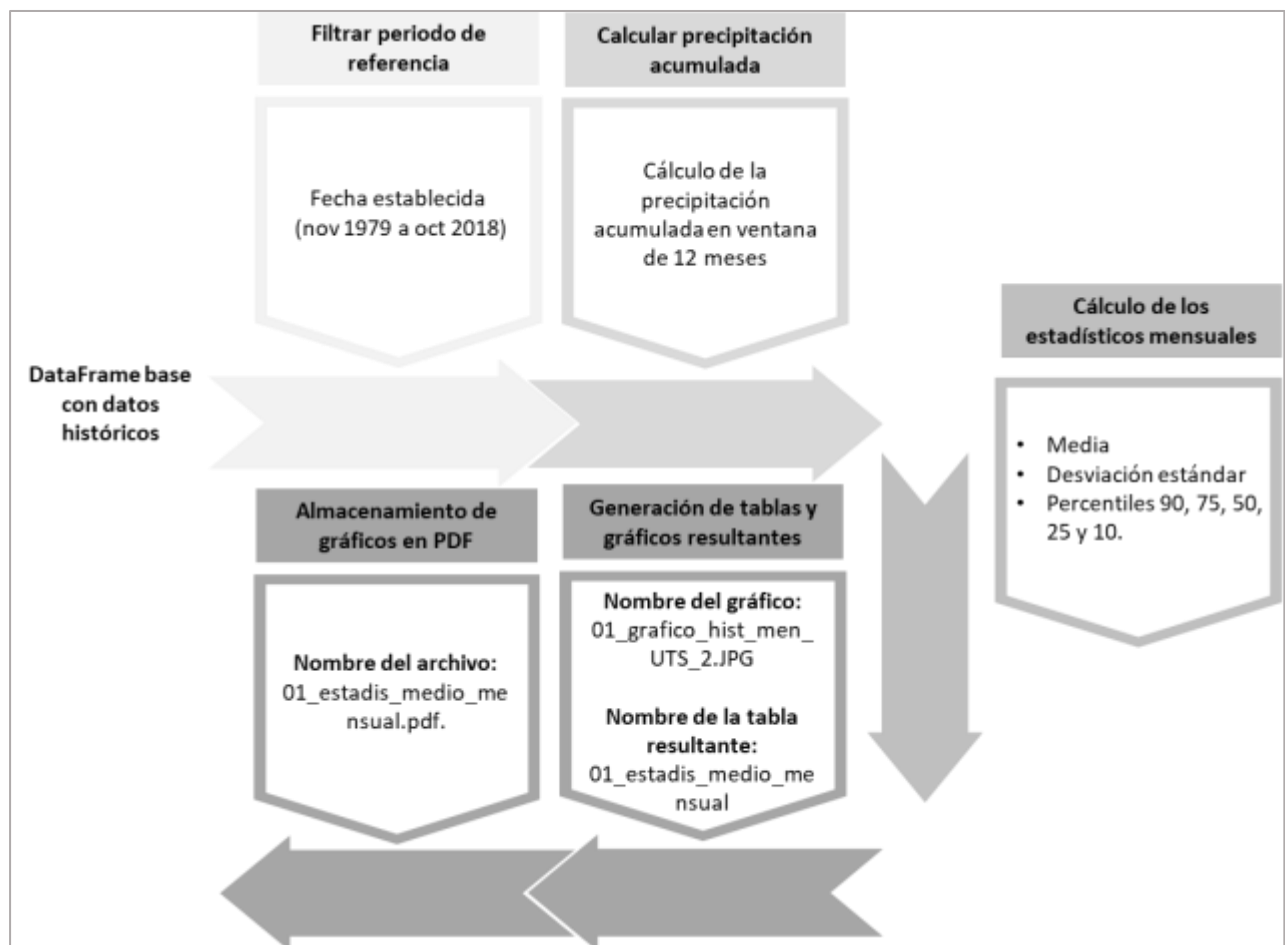
A partir de los datos estructurados en DataFrames se analizan los datos de precipitación, calculando los estadísticos mensuales de precipitación para cada Unidad Territorial de Sequía (UTS).

- El proceso se inicia con un DataFrame base que contiene los datos históricos de precipitación. A partir del cual se siguen los siguientes pasos:
- **Filtrar periodo de referencia:** Se seleccionan los datos correspondientes al periodo de referencia establecido (noviembre de 1979 a octubre de 2018), descartando los datos fuera de este rango temporal.
- **Calcular precipitación acumulada:** Se calcula la precipitación acumulada en ventanas de 12 meses, lo que permite suavizar las fluctuaciones mensuales.
- **Cálculo de los estadísticos mensuales:** Para cada mes del año, se calculan los siguientes estadísticos descriptivos: media, desviación estándar y percentiles 90, 75, 50, 25 y 10.
- **Generación de tablas y gráficos resultantes:** A partir de los estadísticos calculados, se generan tablas y gráficos para visualizar los resultados. El nombre del gráfico generado sigue el formato "01\_grafico\_hist\_men\_UTS\_2.JPG", mientras que el nombre de la tabla resultante sigue el formato "01\_estadis\_medio\_mensual".

- **Almacenamiento de gráficos en PDF:** Finalmente, los gráficos generados se almacenan en un archivo PDF con el nombre "01\_estadis\_medio\_mensual.pdf".

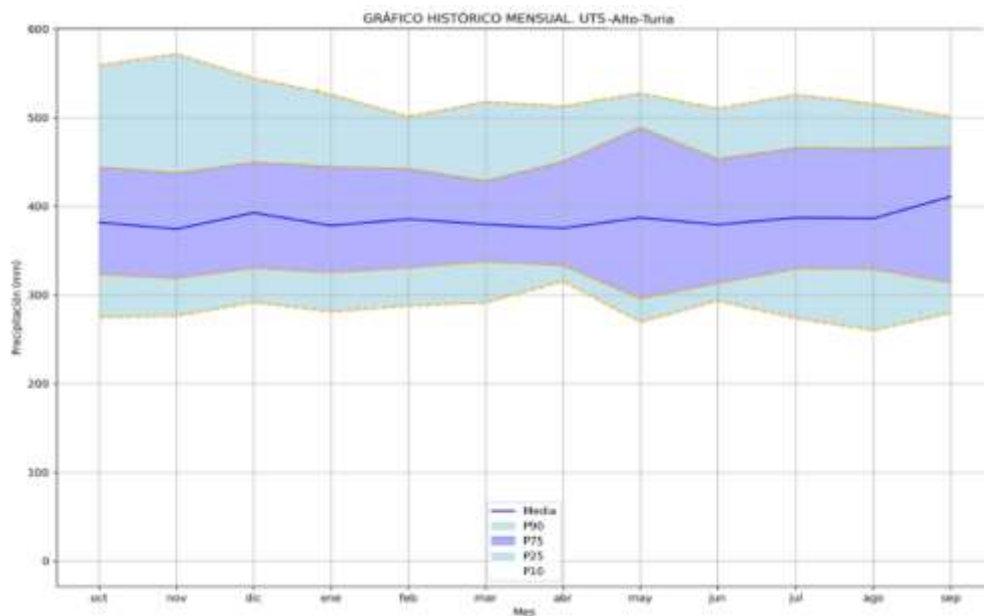
Este proceso permite obtener una visión detallada del comportamiento de la precipitación a lo largo del año. La figura 15 presenta una representación visual del proceso de cálculo de estadísticos mensuales.

Figura 15. Diagrama representativo del procesamiento para obtención de estadísticos mensuales.



En la figura 16 se muestra el resultado del estadístico mensual de la serie de referencia de la UTS Alto Turia. Este tipo de gráfico permite visualizar la evolución de la media y los percentiles 90, 75, 25 y 10 de la precipitación acumulada a 12 meses.

Figura 16. Serie histórica mensual UTS Alto Turia.



### 5.2.2 Índice de Estado de Sequía Prolongada histórico

Para determinar el estado histórico de sequía en cada Unidad Territorial de Sequía (UTS), se calculó el Índice de Estado de Sequía (IES) a partir de los datos históricos de precipitación. Este proceso consistió en la transformación y análisis estadístico de la precipitación acumulada, permitiendo identificar periodos de sequía y normalidad a lo largo del tiempo. La metodología implementada consta de las siguientes etapas:

- **Selección del periodo de cálculo y filtrado de datos:** Se define el periodo para el análisis, en este caso, desde noviembre de 1970 hasta enero de 2025 y se extraen los datos de precipitación correspondientes a cada Unidad Territorial de Sequía (UTS) dentro del periodo de cálculo. Esta selección garantiza una base de datos suficientemente amplia y representativa, permitiendo capturar tanto eventos extremos como periodos de normalidad en la serie histórica.
- **Cálculo de precipitación acumulada:** Se calcula la precipitación acumulada en ventanas de 12 meses, lo que ayuda a suavizar las fluctuaciones mensuales, eliminando el ruido asociado a la variabilidad de corto plazo y facilitando la detección de tendencias a largo plazo.
- **Transformación logarítmica:** Se aplica una transformación logarítmica (sumando 1 para evitar errores con valores cero) a los valores de precipitación

acumulada Esta transformación contribuye a normalizar la distribución de los datos, mejorando la comparabilidad entre diferentes periodos y unidades territoriales.

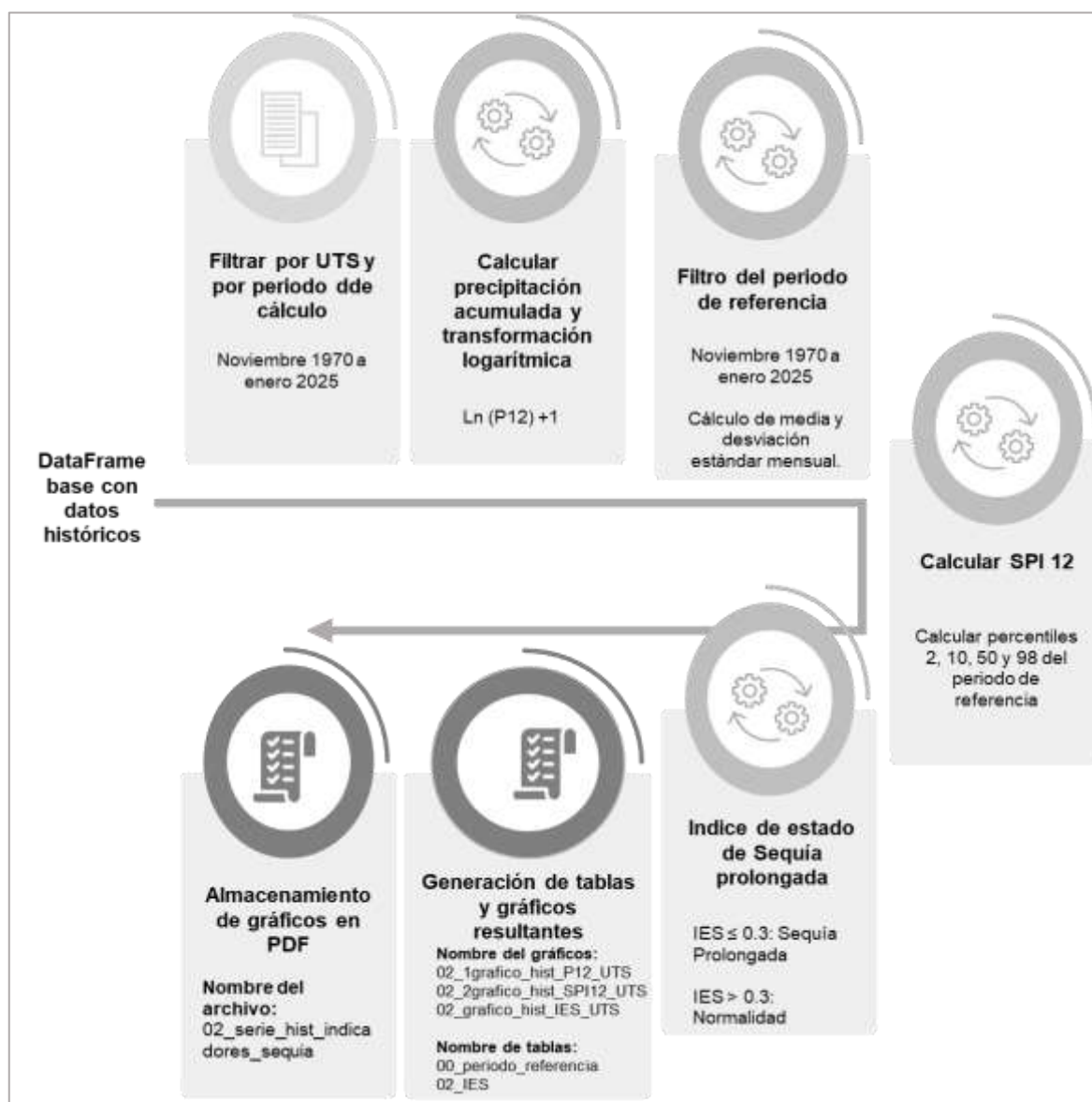
- **Cálculo de estadísticos del periodo de referencia:** Para cada mes (octubre a septiembre), se calculan la media y la desviación estándar de la precipitación logarítmica acumulada, utilizando únicamente los datos del periodo de referencia. Este paso es fundamental para establecer los parámetros de referencia frente a los cuales se evaluarán las condiciones actuales y pasadas.
- **Cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-12):** El SPI-12 se obtiene a partir de la precipitación acumulada y sus estadísticos. Este índice es ampliamente utilizado en la literatura científica para el seguimiento de sequías, debido a su capacidad para comparar diferentes regiones y escalas temporales.
- **Cálculo de percentiles de referencia del SPI:** Se calculan los percentiles 2, 10, 50 y 98 del SPI durante el periodo de referencia, permitiendo caracterizar la distribución de la precipitación y establecer umbrales objetivos para la identificación de situaciones anómalas, como la sequía prolongada.
- **Escalado del IES:** Basándose en la metodología definida en el apartado 2.1, se escala el SPI al rango entre 0 y 1, utilizando los percentiles de la serie de referencia. El umbral de sequía prolongada se establece en 0.3, que corresponde al percentil 10 de la serie de referencia.
- **Reescalado y categorización:** El IES se ajustó para asegurar que sus valores estén dentro del rango (0 y 1) y se asignó la categoría de sequía según:

$IES \leq 0.3$ : Sequía Prolongada

$IES > 0.3$ : Normalidad

La figura 17 muestra un diagrama sintetizado del proceso realizado en Python, proporcionando una visión estructurada de la secuencia de pasos implementados en el análisis.

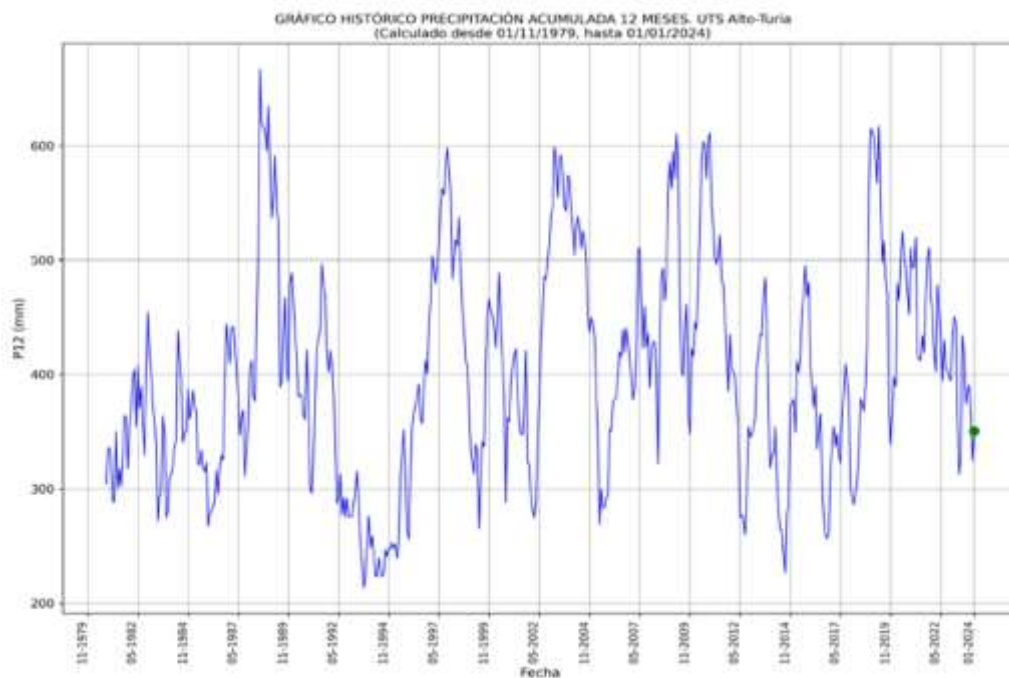
Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de cálculo del Índice de Estado de Sequía (IES).



A continuación, se muestran los gráficos resultantes de precipitación acumulada a 12 meses, SPI12 y el Índice de Estado de Sequía.

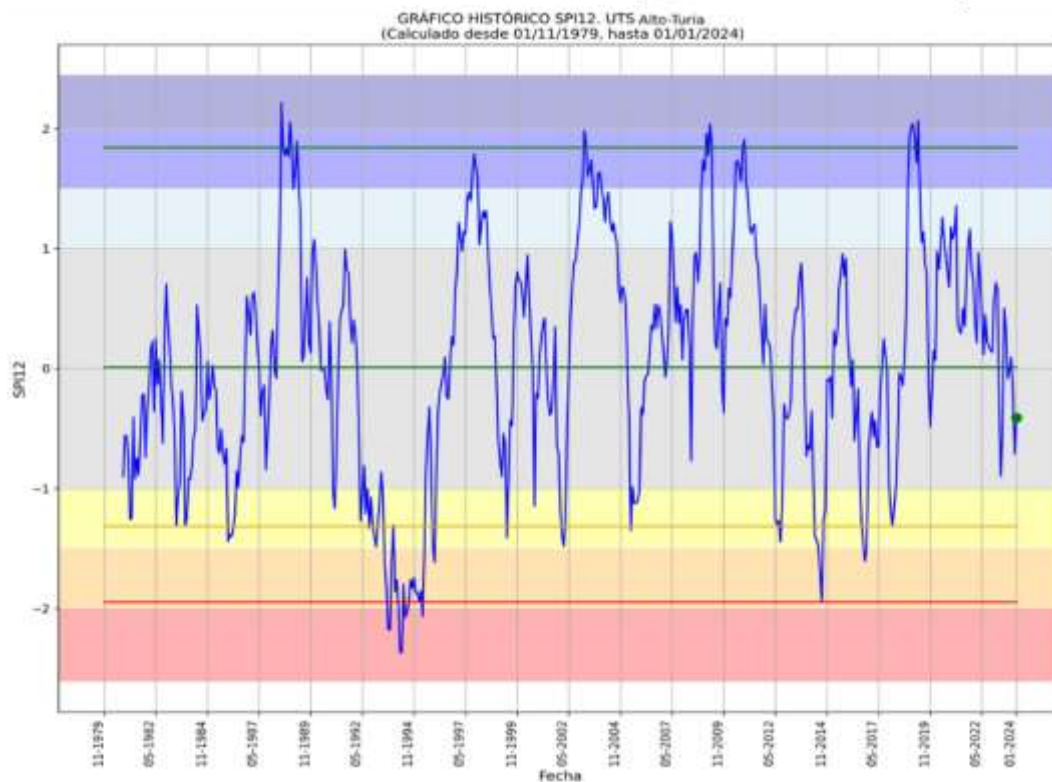
La Precipitación acumulada a 12 meses, muestran la evolución mensual de la precipitación acumulada para cada UTS. Estos valores son el punto de partida para el cálculo del Índice de Estado de Sequía prolongada. En la figura 18 se observa un marcador de color verde el cual señala la fecha hasta la cual se realiza el análisis.

Figura 18. Precipitación Areal UTS Alto Turia 1975-2024.



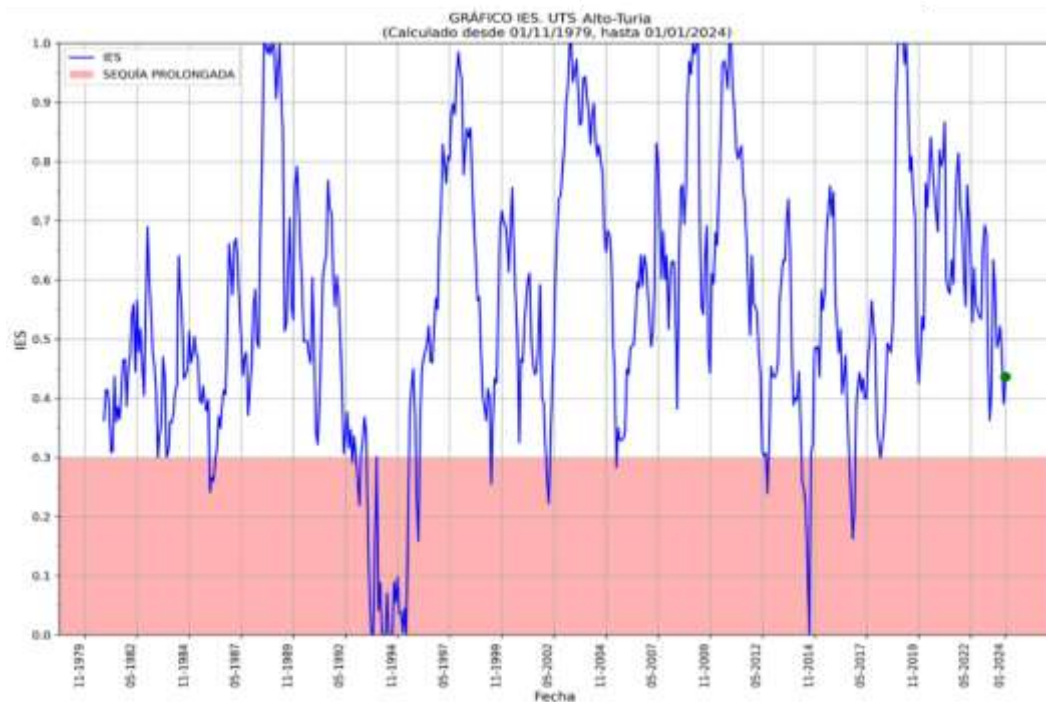
Con los datos de precipitación areal se procede a obtener el SPI 12, la figura 19 representa la transformación logarítmica de la precipitación acumulada y su estandarización a la distribución normal, con referencia al periodo 1980-2018.

Figura 19. SPI 12 para UTS Alto Turia.



Finalmente, la figura 20 muestra la gráfica resultante del cálculo del Índice de Estado de Sequía Prolongada. Esta gráfica incluye el IES histórico escalado (adimensional de 0 a 1), el umbral de sequía prolongada que corresponde al percentil 10 de la serie de referencia y los percentiles 2, 50 y 98.

*Figura 20. IES-UTS Alto Turia.*



## 5.3 BLOQUE2: PREDICCIÓN ESTACIONAL

El cálculo de la predicción del Índice de estado de Sequía Prolongada, se basa en las metodologías propuesta por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) para determinar la variabilidad climática futura. Para la primera predicción se utilizan los registros de precipitación histórica, considerando cada año hidrológico de la serie como base para el análisis. La segunda predicción se centra en las predicciones climáticas generadas por los centros especializados en modelización climática. En este proyecto, se emplearán los datos proporcionados por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF), que ofrece mapas de precipitación y temperatura.

Una vez programado el bloque metodológico 1 procedemos a calcular la predicción desde la fecha actual (en este proyecto enero de 2025) utilizando las dos metodologías, tanto histórica como con datos del ECMWF.

### 5.3.1 Predicción estacional basada en datos de precipitación histórica

Para calcular la predicción estacional con lluvias históricas, es necesario definir los años hidrológicos que se emplearán como “Casos de predicción”. En este proyecto dichos casos corresponden a los valores de precipitación mensual del periodo de referencia, desde noviembre de 1979 hasta septiembre de 2018, lo que da un total de 39 casos de predicción.

Esta metodología consiste en que, a partir de enero de 2025, se agregará cada año hidrológico transcurrido en el pasado a la serie histórica de precipitación mensual, teniendo un total de 39 casos de predicción agregadas.

Los valores agregados van en función al mes de partida de la predicción, es decir si la predicción se realiza desde abril a septiembre se trabajan con dos los valores de dos años hidrológicos, mientras que si es de octubre a marzo con los valores de un año hidrológico. Esta división de meses se realiza con el objetivo de contar con datos suficientes para la predicción.

Una vez obtenida la serie histórica mensual por cada Unidad Territorial de Sequía y sus respectivas repeticiones se calcula el Índice de Estado de Sequía prolongada, cumpliendo con la metodología detallada en el apartado 2.1.

Finalmente, con el conjunto de casos de predicción se procede a obtener los percentiles 90, 75, 50, 25 y 10, los cuales determinan la horquilla de la predicción con datos históricos.

Para calcular en Python la predicción estacional utilizando datos históricos de precipitación como "miembros" o escenarios posibles se siguió el siguiente proceso metodológico:

- **Periodo de búsqueda de lluvias históricas:** Se establecen las fechas de inicio y fin para seleccionar los años históricos que se utilizarán como "casos" en la predicción.
- **Fecha final de cálculo:** Se define la fecha final de los datos históricos disponibles, a partir de la cual se realiza la predicción.
- **Creación de un DataFrame auxiliar con las fechas de predicción:** Se determina el horizonte temporal de la predicción, que puede ser de uno o dos años según el mes en que finalicen los datos históricos. El condicionante utilizado es que si el mes de inicio de la predicción es de abril a septiembre se utilizarán dos años hidrológicos; caso contrario, se utilizará un año hidrológico.  
  
Este DataFrame auxiliar contiene las fechas para el periodo de predicción y se utilizará para injertar los datos históricos en la serie base.
- **Ampliación del DataFrame base para múltiples casos:** Con el fin de incorporar los distintos escenarios de predicción, los valores históricos de precipitación mensual se replican en base a los casos de predicción definidos. Este proceso genera un DataFrame ampliado, donde cada repetición representa un escenario predictivo distinto.
- **Implementación del periodo de predicción en el DataFrame:** A partir del mes de inicio de la predicción, cada caso evoluciona siguiendo una serie temporal distinta, basada en los datos históricos de precipitación correspondientes a diferentes años hidrológicos. Es decir, los valores definidos en el DataFrame auxiliar con las fechas de predicción se injertan en la serie de casos base, y a partir del período de predicción, cada serie evoluciona de manera independiente, reflejando distintos años históricos que sirven como escenarios posibles.

Una vez definido los casos de predicción se procede con la metodología definida para calcular el Índice de estado de Sequía Prolongada.

- **Cálculo de precipitación acumulada para 12 meses:** Se calcula la precipitación acumulada en ventanas de 12 meses para suavizar las fluctuaciones mensuales.
- **Transformación logarítmica de la precipitación acumulada:** Se aplica una transformación logarítmica (sumando 1 para evitar errores con valores cero) a los valores de precipitación acumulada.
- **Cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-12):** Se calcula el SPI-12 utilizando la precipitación logarítmica acumulada y los estadísticos del periodo de referencia.
- **Escalado del IES:** Se escala el SPI al rango entre 0 y 1, en base a los percentiles de referencia.
- **Reescalado y categorización:** Se reescala el IES para asegurar que los valores estén dentro del rango (0 y 1) y se asigna la categoría de sequía según:  
 $IES \leq 0.3$ : Sequía Prolongada y  $IES > 0.3$ : Normalidad
- **Cálculo de percentiles de los casos de predicción:** En base a los casos de predicción se calcula los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90.
- **Generación de tablas y gráficos:** A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron 7 gráficos y 2 tablas por UTS. A continuación, se muestra el detalle de los resultados obtenidos:

Gráfico 1: " 03\_1grafico\_predi\_hist\_p12\_UTS", que representa el cálculo de la precipitación acumulada a 12 meses.

Figura 21. Gráficos resultantes 03\_1grafico\_predi\_hist\_p12\_UTS.

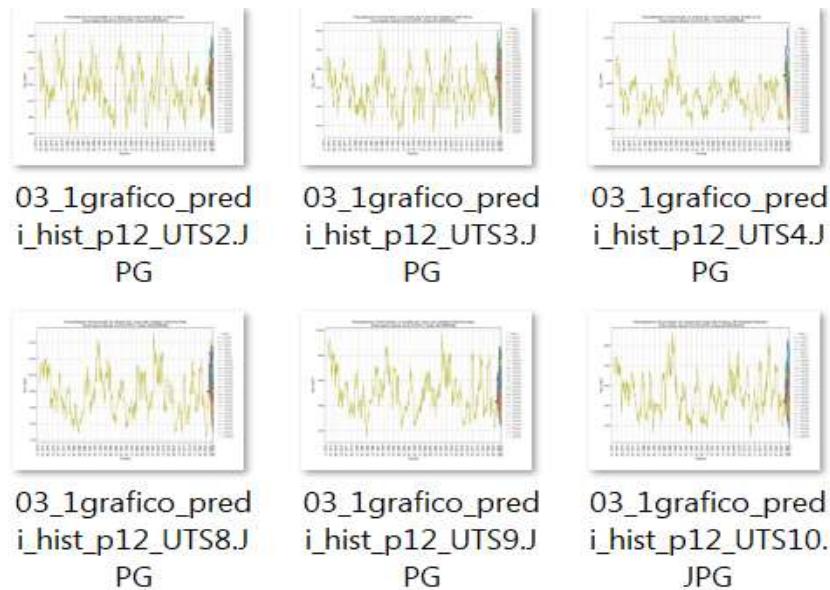


Gráfico 2: " 03\_1grafico\_predi\_hist\_P12\_\_zoom\_UTS", corresponde al gráfico de precipitación acumulada a 12 meses con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la serie.

Figura 22. Gráficos resultantes 03\_1grafico\_predi\_hist\_P12\_\_zoom\_UTS.

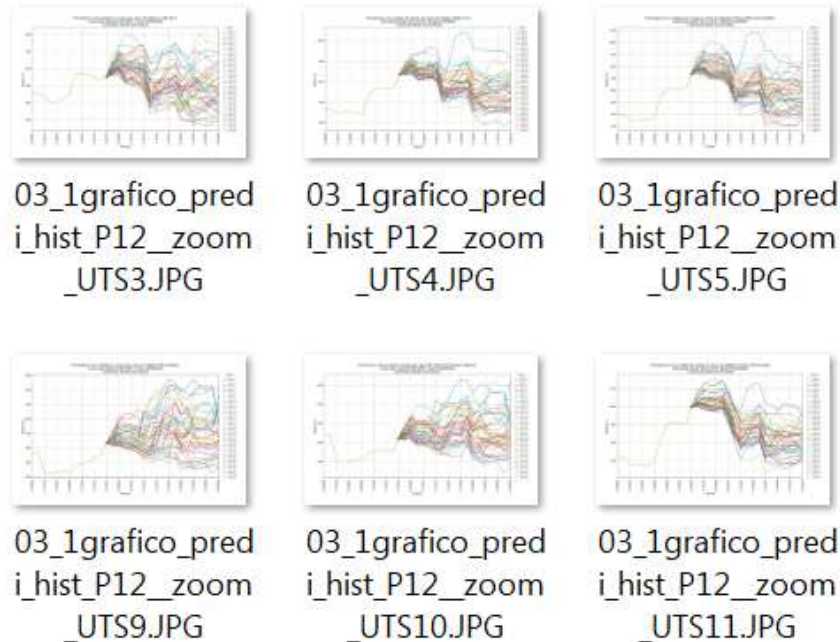


Gráfico 3: " 03\_2grafico\_predi\_hist\_SPI12\_UTS", representa el cálculo del SPI 12, tanto para la serie histórica como para los posibles casos futuros de predicción estacional.

Figura 23. Gráficos resultantes 03\_2grafico\_predi\_hist\_SPI12\_UTS.

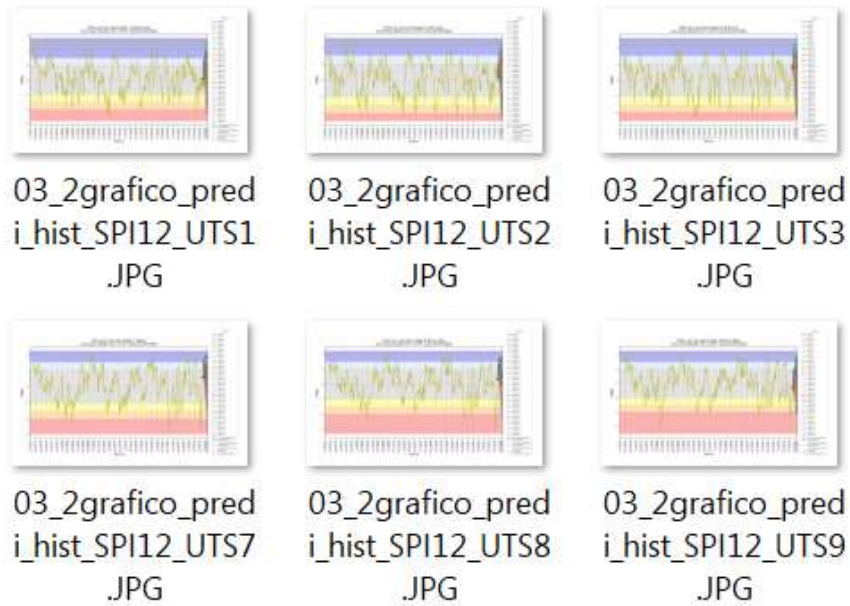


Gráfico 4: " 03\_2grafico\_predi\_hist\_SPI12\_zoom\_UTS", corresponde al gráfico 3 con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la serie.

Figura 24. Gráficos resultantes 03\_2grafico\_predi\_hist\_SPI12\_zoom\_UTS.

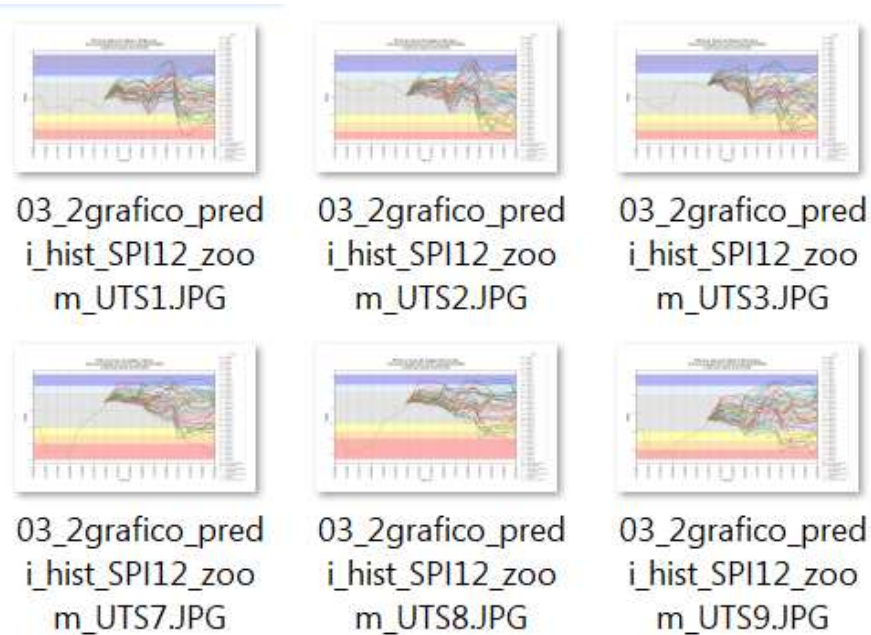


Gráfico 5: " 03\_3grafico\_predi\_hist\_IES\_UTS", que representa el cálculo del IES para toda la serie histórica y para la predicción realizada con datos históricos.

Figura 25. Gráficos resultantes 03\_3grafico\_predi\_hist\_IES\_UTS.

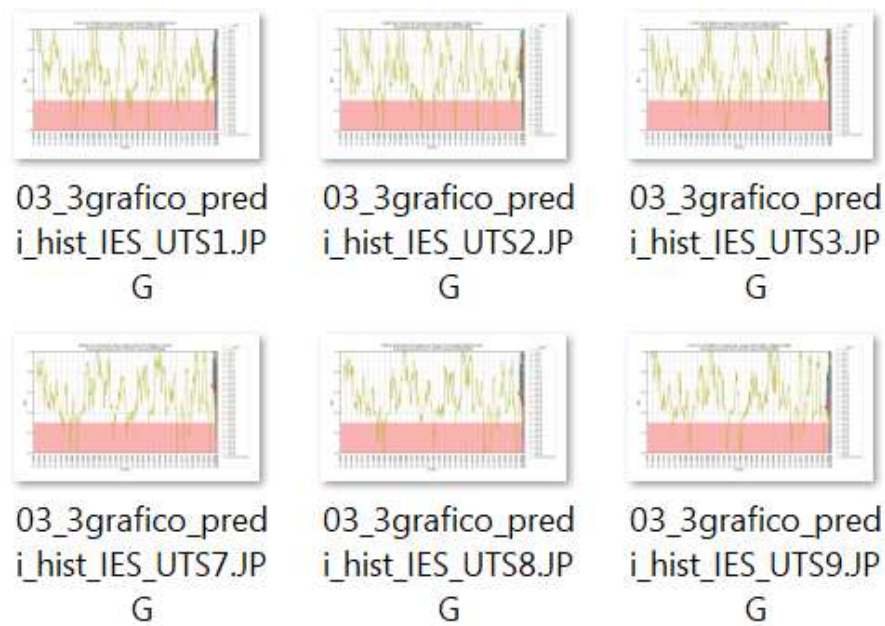


Gráfico 6: " 03\_3grafico\_predi\_hist\_IES\_zoom\_UTS", corresponde al cálculo del IES con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la serie.

Figura 26. Gráficos resultantes 03\_3grafico\_predi\_hist\_IES\_zoom\_UTS.

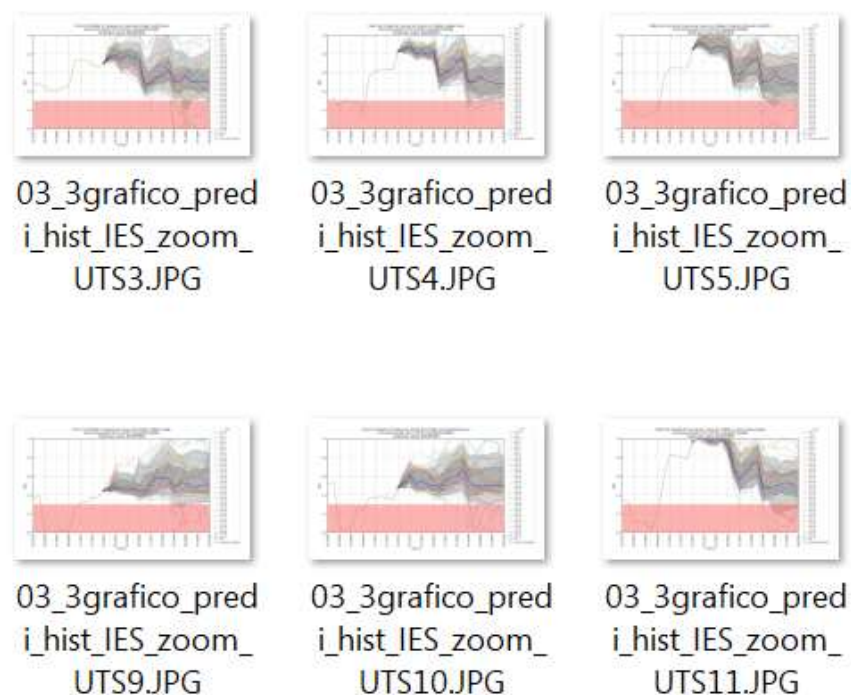


Gráfico 7: " 03\_3grafico\_predi\_hist\_IES\_zoom\_perc\_UTS", corresponde al gráfico de IES con zoom ampliado para visualizar de mejor manera la serie y solo percentiles de los casos de predicción.

*Tabla 9 Documento resultante 03 1predic hist IES.*

| id | date       | hour  | day | hour | days | dataset | name | cat | market | hazmat | consequence | type | type | level | unit | SPTE | SP100 | SP1000 | SP10000 | near | gsm | acc | acc | IES | driving |
|----|------------|-------|-----|------|------|---------|------|-----|--------|--------|-------------|------|------|-------|------|------|-------|--------|---------|------|-----|-----|-----|-----|---------|
| 1  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 2  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 3  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 4  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 5  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 6  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 7  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 8  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 9  | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 10 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 11 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 12 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 13 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 14 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 15 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 16 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 17 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 18 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 19 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 20 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 21 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 22 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 23 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 24 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 25 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 26 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 27 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 28 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 29 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 30 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 31 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 32 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 33 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 34 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 35 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 36 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 37 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 38 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 39 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 40 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 41 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 42 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 43 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 44 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 45 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 46 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 47 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 48 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 49 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 50 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 51 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 52 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 53 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 54 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 55 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 56 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 57 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 58 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 59 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 60 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 61 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 62 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 63 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 64 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 65 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 66 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 67 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 68 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 69 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 70 | 1971-01-01 | 00:00 | 1   | 1    | 1    | 1       | 1    | 1   | 1      | 1      | 1           | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1      | 1       | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1       |
| 71 | 1971-01-01 | 00:00 |     |      |      |         |      |     |        |        |             |      |      |       |      |      |       |        |         |      |     |     |     |     |         |

46

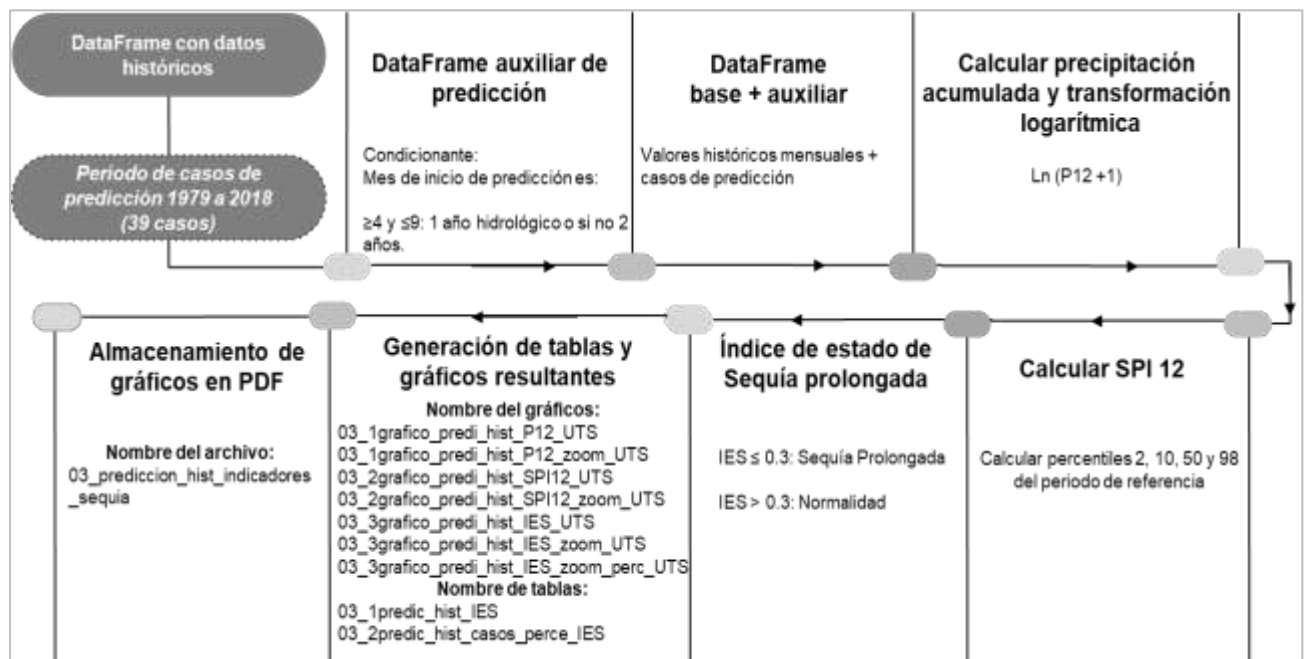
Tabla 10. Documento resultante 03\_2predic\_hist\_casos\_perce\_IES.

| codigo | fecha      | p90      | p75      | p50      | p25      | p10      |
|--------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1      | 2025-04-01 | 0.673793 | 0.632997 | 0.602272 | 0.557563 | 0.523757 |
| 1      | 2025-05-01 | 0.774818 | 0.740464 | 0.687109 | 0.621777 | 0.555708 |
| 1      | 2025-06-01 | 0.749827 | 0.654781 | 0.580534 | 0.495594 | 0.475585 |
| 1      | 2025-07-01 | 0.775381 | 0.664697 | 0.598648 | 0.499155 | 0.481015 |
| 1      | 2025-08-01 | 0.783677 | 0.681391 | 0.590263 | 0.519107 | 0.480762 |
| 1      | 2025-09-01 | 0.803121 | 0.663132 | 0.563196 | 0.495994 | 0.472101 |
| 1      | 2025-10-01 | 0.703106 | 0.623386 | 0.486958 | 0.443629 | 0.382985 |
| 1      | 2025-11-01 | 0.830566 | 0.682248 | 0.588683 | 0.490701 | 0.429676 |
| 1      | 2025-12-01 | 0.901625 | 0.786688 | 0.650683 | 0.567855 | 0.478204 |
| 1      | 2026-01-01 | 0.954125 | 0.873095 | 0.701417 | 0.59646  | 0.485403 |
| 1      | 2026-02-01 | 1        | 0.921879 | 0.769555 | 0.606213 | 0.516808 |
| 1      | 2026-03-01 | 0.83687  | 0.689347 | 0.481365 | 0.366521 | 0.307017 |
| 1      | 2026-04-01 | 0.844828 | 0.711895 | 0.502845 | 0.380557 | 0.337046 |
| 1      | 2026-05-01 | 0.831313 | 0.713893 | 0.506677 | 0.397354 | 0.296811 |
| 1      | 2026-06-01 | 0.835683 | 0.648923 | 0.495716 | 0.385235 | 0.257963 |
| 1      | 2026-07-01 | 0.860476 | 0.650242 | 0.498074 | 0.398975 | 0.304898 |
| 1      | 2026-08-01 | 0.825391 | 0.634393 | 0.530385 | 0.385899 | 0.30499  |
| 1      | 2026-09-01 | 0.827138 | 0.647811 | 0.5013   | 0.386592 | 0.281094 |
| 2      | 2025-04-01 | 0.729347 | 0.667329 | 0.61965  | 0.592714 | 0.554699 |
| 2      | 2025-05-01 | 0.789098 | 0.746526 | 0.69465  | 0.639301 | 0.566142 |
| 2      | 2025-06-01 | 0.775552 | 0.730384 | 0.650507 | 0.568811 | 0.528245 |
| 2      | 2025-07-01 | 0.786861 | 0.758415 | 0.664215 | 0.592565 | 0.554809 |
| 2      | 2025-08-01 | 0.793437 | 0.734421 | 0.644321 | 0.578985 | 0.505874 |
| 2      | 2025-09-01 | 0.822907 | 0.732345 | 0.669164 | 0.567246 | 0.513116 |
| 2      | 2025-10-01 | 0.677337 | 0.606452 | 0.520757 | 0.440874 | 0.387989 |

- ♣ **Almacenamiento de gráficos en PDF:** Los gráficos generados se almacenan en un archivo PDF con el nombre " 03\_prediccion\_hist\_indicadores\_sequia".

La figura 28 muestra una la secuencia gráfica de manera sintetizada de los pasos realizados.

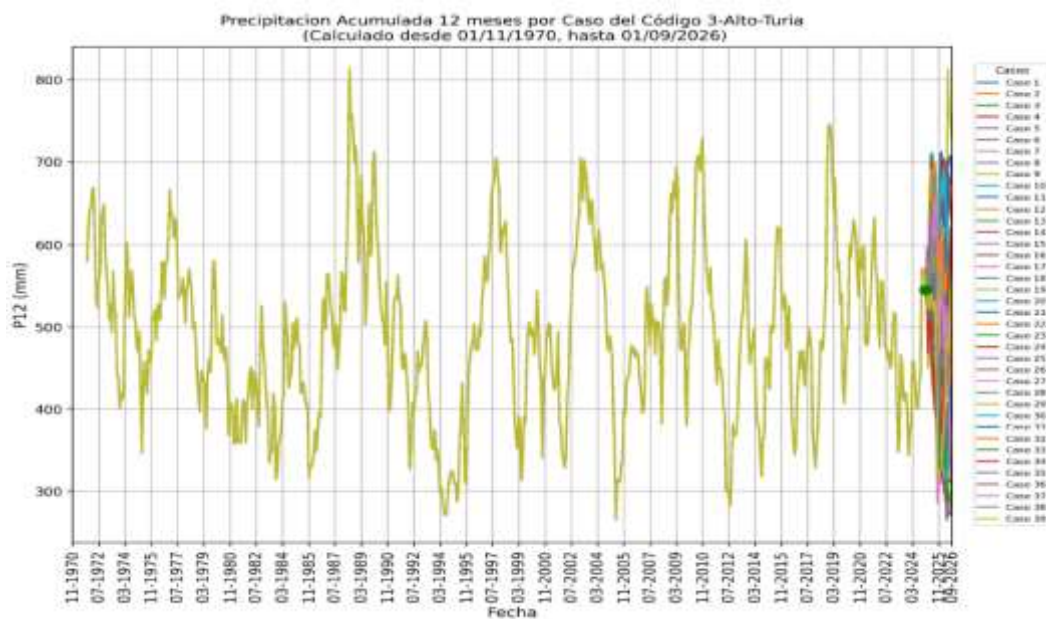
Figura 28. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) con datos históricos.



A continuación, se muestran los gráficos resultantes de la predicción con datos históricos, tanto para la precipitación acumulada a 12 meses, SPI12 y el Índice de Estado de Sequía.

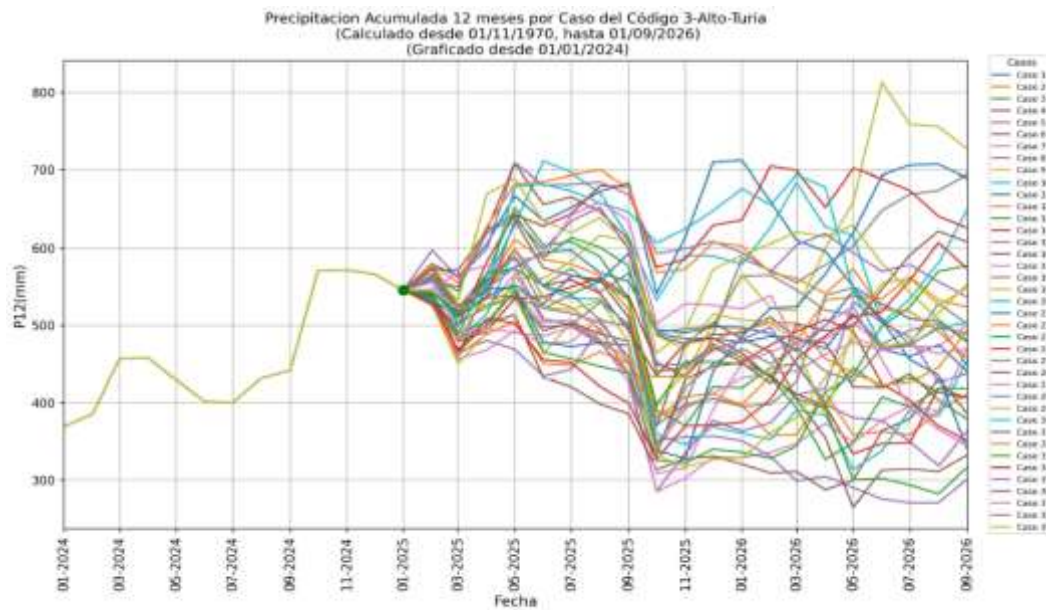
**Precipitación acumulas:** La figura 29 que muestran la evolución de la precipitación acumulada a 12 meses y la predicción histórica desde enero de 2025 hasta finales del año hidrológico del próximo año, es decir septiembre 2026.

*Figura 29. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, Precipitación acumulada 12M. UTS Alto Turia.*



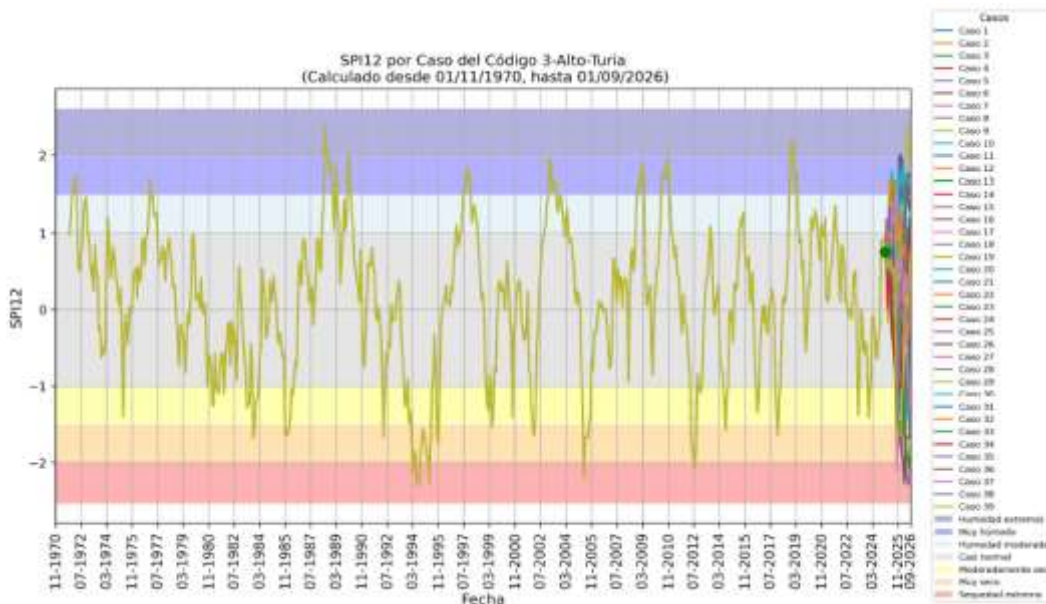
La figura 30 muestra una ampliación de la predicción de la precipitación acumulada a 12 meses, con el objetivo de visualizar de mejor manera los resultados.

Figura 30. Ampliación de predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, Precipitación acumulada 12M. UTS Alto Turia.



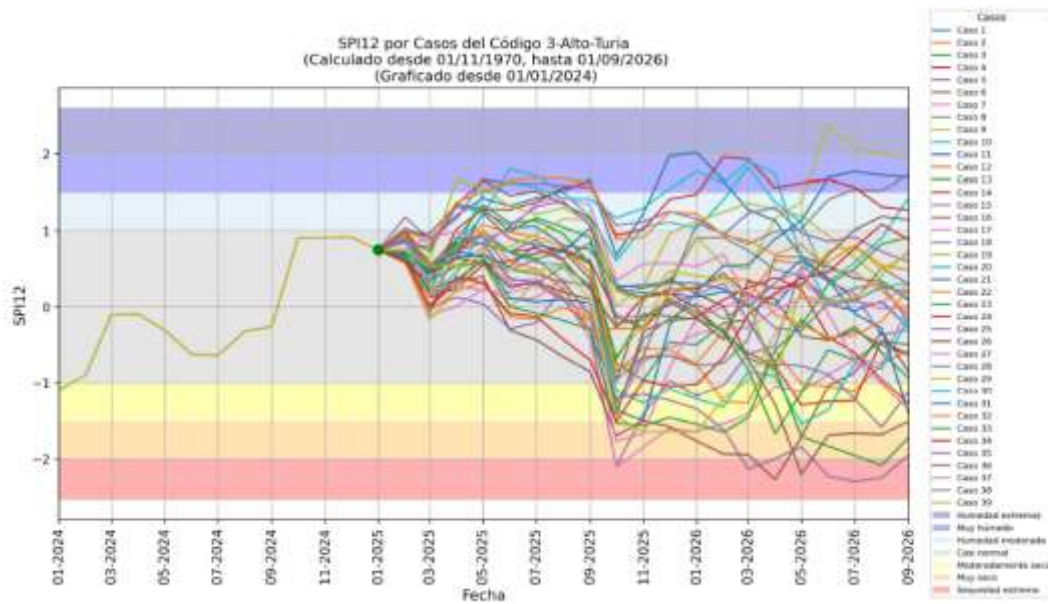
**SPI12:** La figura 31 muestra la transformación logarítmica y estandarización a distribución normal de la serie de precipitación acumulada de 12 meses.

Figura 31. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, SPI 12. UTS Alto Turia.



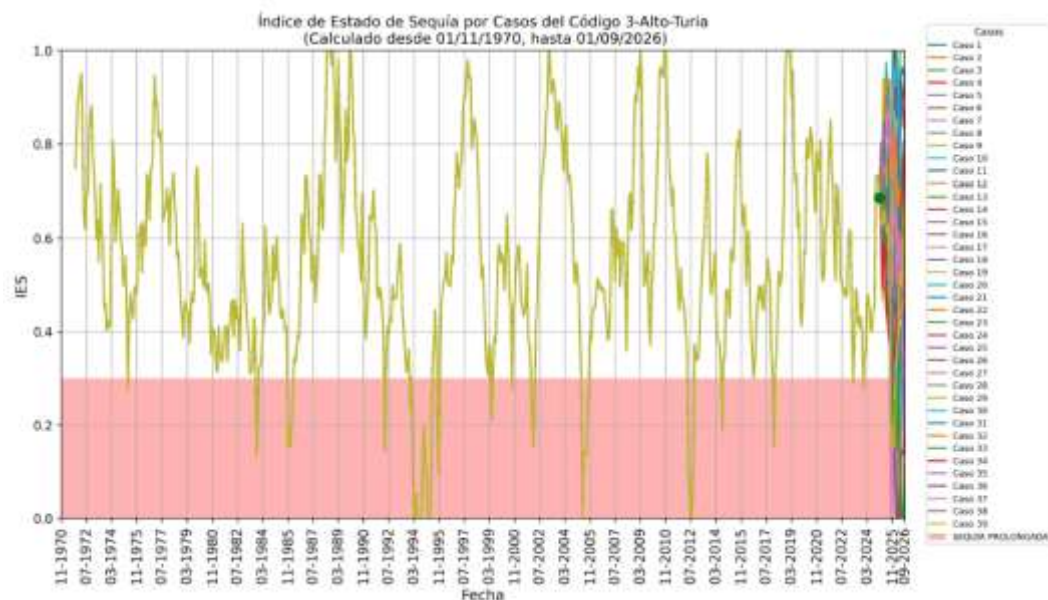
De igual manera se realiza una ampliación del periodo de predicción para facilitar la visualización.

Figura 32. Ampliación de la predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, SPI 12. UTS Alto Turia.



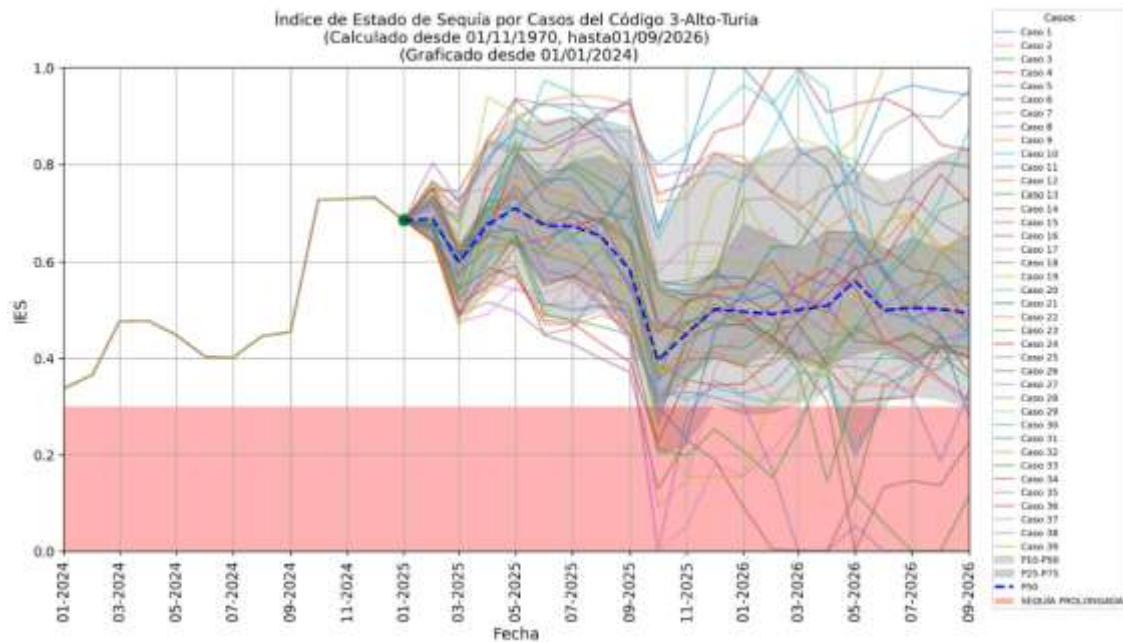
**IES:** la figura 33 muestra los 39 escenarios de predicción del Índice de Estado de Sequía Prolongada hasta septiembre de 2026 y se define el umbral de sequía prolongada que corresponde al valor adimensional de 0.3.

Figura 33. Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, IES. UTS Alto Turia.



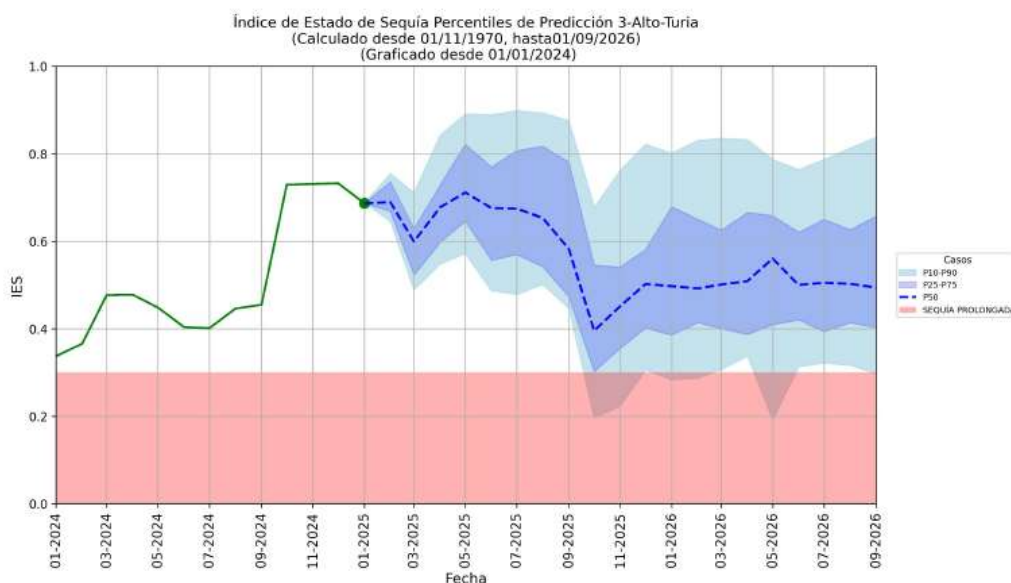
La figura 34 es la ampliación de la zona de predicción. Adicional se agrega los percentiles 2, 10, 50, 75 y 90, definidos por los 39 casos de predicción futura.

Figura 34. Ampliación de la Predicción Histórica ENE 2025 a SEP 2026, IES. UTS Alto Turia.



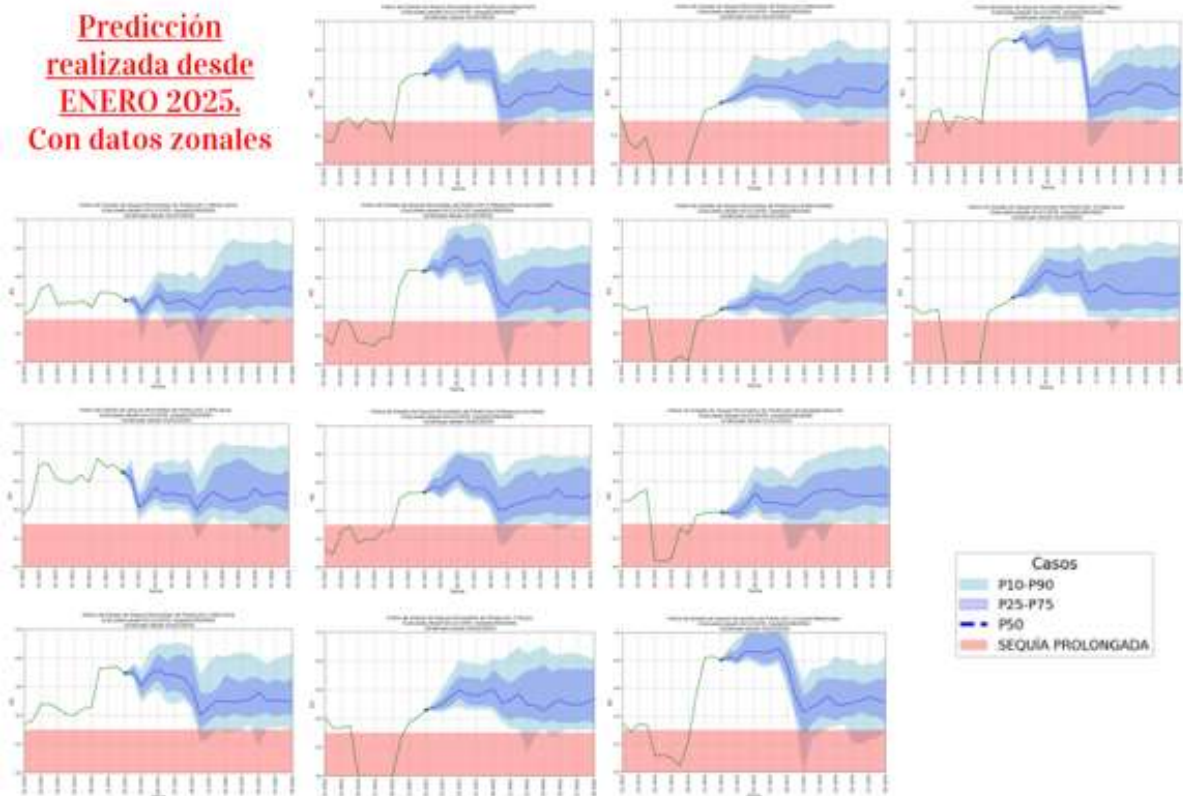
Además, en la figura 35 se muestra una versión simplificada que muestra exclusivamente los rangos de los percentiles para una visión clara de la variabilidad esperada.

Figura 35. Resultados gráficos de la predicción del IES (rangos percentiles) con datos históricos.



Con el objetivo de mostrar la efectividad del modelo realizado se agrega la figura 36, la cual muestra la predicción con datos históricos del Índice de Sequía Prolongada calculada desde el mes de enero 2025.

Figura 36 Predicción del IES de las 13 UTS.



### 5.3.2 Predicción estacional basada en los datos del ECMWF

Para obtener la segunda metodología de predicción utilizamos los datos del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (siglas en ingles ECMWF), los cuales son de libre acceso y se encuentran en el portal de la base de datos como "Predicción estacional". Estos datos son obtenidos mediante extracción areal para cada Unidad Territorial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

Para calcular la predicción estacional en PYTHON se utiliza el DataFrame con los 51 datos de precipitación futura del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) como "casos" o escenarios posibles, a continuación, se detalla el procedimiento realizado:

- ♦ **Cálculo de la fecha final de la predicción:** Se calcula la fecha final de la predicción sumando 6 meses a la fecha final de los datos históricos.
- ♦ **Ampliación del DataFrame base para múltiples casos:** Los valores históricos de precipitación mensual se replican 51 veces (una por cada caso de

predicción del ECMWF), generando un DataFrame ampliado que incluye todos los escenarios posibles.

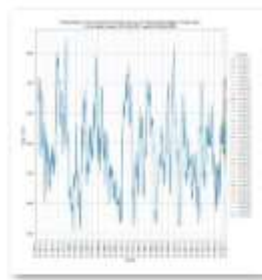
- ♦ **DataFrame con los datos del ECMWF:** Este DataFrame contiene los datos de precipitación mensual del ECMWF para los 51 casos cada Unidad Territorial de Sequía (UTS).
- ♦ **Implementación del periodo de predicción en el DataFrame:** A partir del mes de inicio de la predicción, se injertan los valores del DataFrame-ECMWF en el DataFrame ampliado, asignando a cada caso los datos correspondientes a un miembro específico del ECMWF. Esto genera 51 series temporales que representan escenarios futuros posibles

Una vez definidos los casos de predicción, se procede con la metodología definida para calcular el Índice de Estado de Sequía Prolongada:

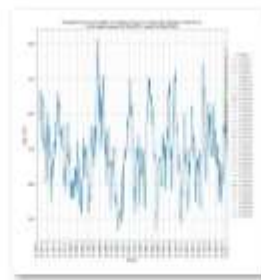
- ♦ **Cálculo de precipitación acumulada para 12 meses:** Se calcula la precipitación acumulada en ventanas de 12 meses.
- ♦ **Transformación logarítmica de la precipitación acumulada:** Se aplica una transformación logarítmica (sumando 1 para evitar errores con valores cero) a los valores de precipitación acumulada.
- ♦ **Cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-12):** Se calcula el SPI-12 utilizando la precipitación logarítmica acumulada y los estadísticos del periodo de referencia.
- ♦ **Escalado del IES:** Se escala el SPI al rango entre 0 y 1, en base a los percentiles de referencia.
- ♦ **Reescalado y categorización:** Se reescala el IES para asegurar que sus valores estén dentro del rango (0 y 1) y se asigna la categoría de sequía ( $IES \leq 0.3$ : Sequía Prolongada y  $IES > 0.3$ : Normalidad).
- ♦ **Cálculo de percentiles de los casos de predicción:** En base a los 51 casos de predicción se calcula los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90.
- ♦ **Generación de tablas y gráficos:** A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron 3 gráficos y 2 tablas por UTS, los cuales se detallan a continuación:

Gráfico 1: " 04\_1grafico\_predi\_ecmwf\_p12\_UTS", que representa el cálculo de la precipitación acumulada a 12 meses.

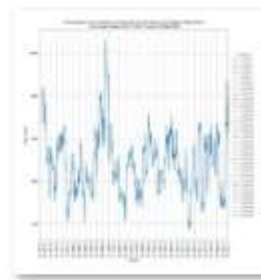
Figura 37. Gráficos resultantes 04\_1grafico\_predi\_ecmwf\_p12\_UTS.



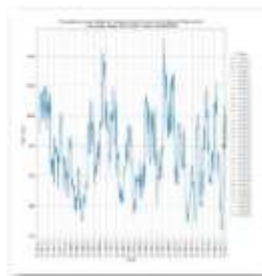
04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
2.JPG



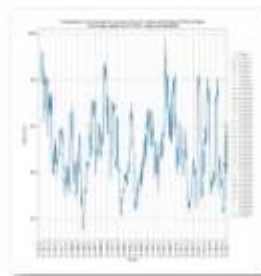
04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
3.JPG



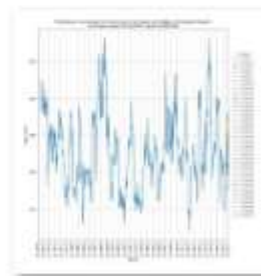
04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
4.JPG



04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
8.JPG



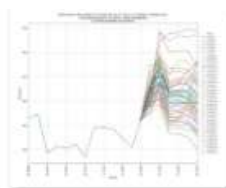
04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
9.JPG



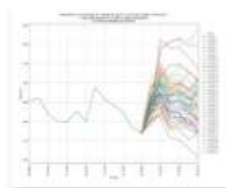
04\_1grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
10.JPG

Gráfico 2: " 04\_2grafico\_predi\_ecmwf\_P12\_\_zoom\_UTS", corresponde a la predicción realizada con datos del ECMWF pero con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la predicción.

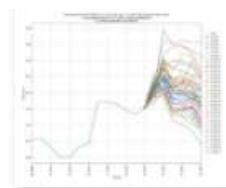
Figura 38. Gráficos resultantes 04\_2grafico\_predi\_ecmwf\_P12\_\_zoom\_UTS.



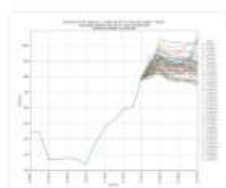
04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
1.JPG



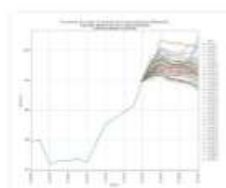
04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
2.JPG



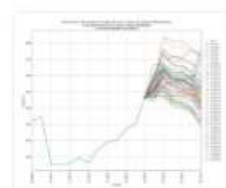
04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
3.JPG



04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
7.JPG



04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
8.JPG



04\_2grafico\_pred  
i\_ecmwf\_p12\_UTS  
9.JPG

Gráfico 3: " 04\_3grafico\_predi\_ecmwf\_SPI12\_UTS", representa el cálculo del SPI 12 tanto para la serie histórica como para los casos de predicción con datos del ECMWF.

Figura 39. Gráficos resultantes 04\_3grafico\_predi\_ecmwf\_SPI12\_UTS.

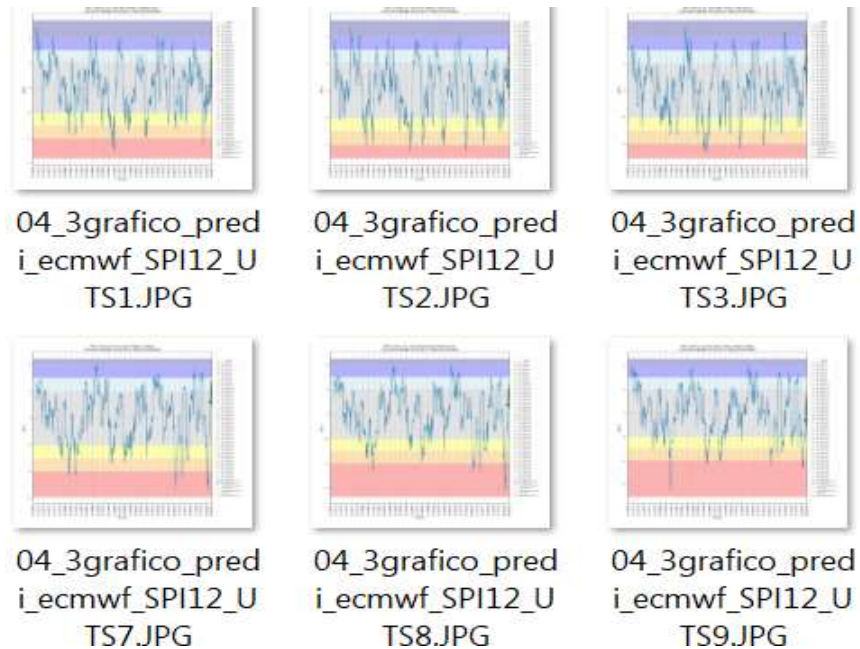


Gráfico 4: " 04\_4grafico\_predi\_ecmwf\_SPI12\_zoom\_UTS", corresponde al cálculo del SPI-12 pero con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la predicción.

Figura 40. Gráficos resultantes 04\_4grafico\_predi\_ecmwf\_SPI12\_zoom\_UTS.

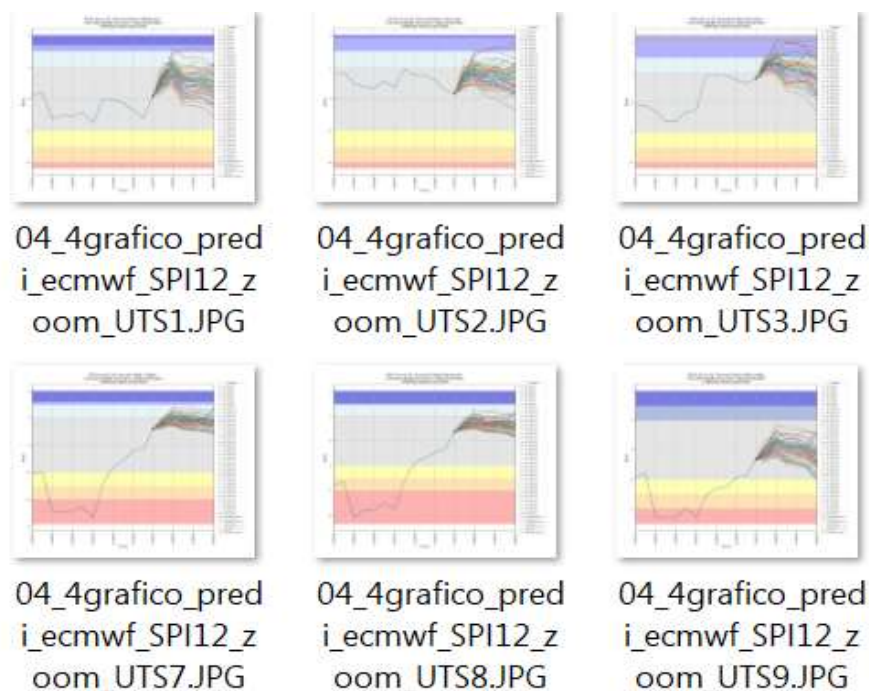
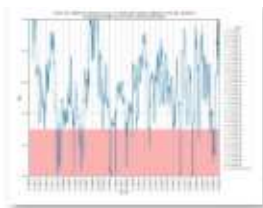


Gráfico 5: " 04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS", representa el cálculo del IES de la serie histórica y de la predicción estacional realizada con datos del ECMWF.

Figura 41. Gráficos resultantes 04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS.



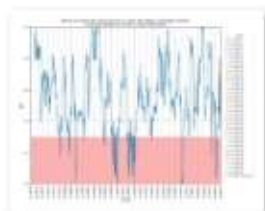
04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
4.JPG



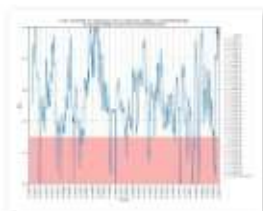
04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
5.JPG



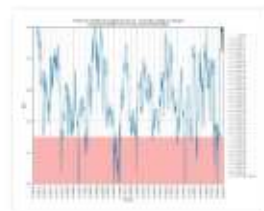
04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
6.JPG



04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
10.JPG



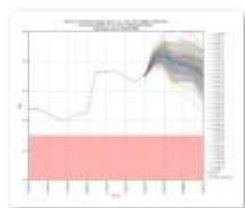
04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
11.JPG



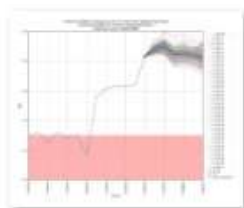
04\_5grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_UTS  
12.JPG

Gráfico 6: " 04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS", corresponde al cálculo del IES pero con un zoom ampliado para visualizar de mejor manera la predicción.

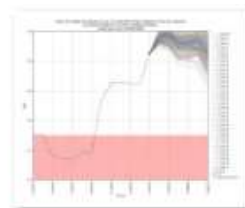
Figura 42. Gráficos resultantes 04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS.



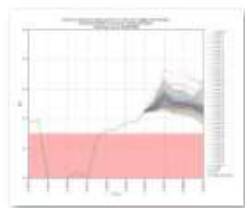
04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS3.JPG



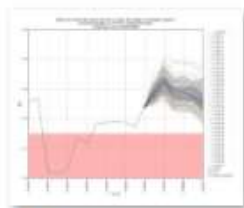
04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS4.JPG



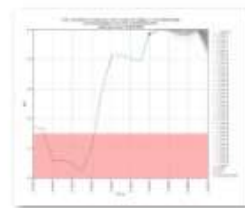
04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS5.JPG



04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS9.JPG



04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS10.JPG



04\_6grafico\_predi\_ ecmwf \_IES\_zoom\_UTS11.JPG

Gràfico 7: "04\_7grafico\_predi\_hist\_IES\_zoom\_perc\_UTS", corresponde al gráfico de IES con un zoom ampliado y solo percentiles de los 51 casos de predicción.

Figura 43. Gráficos resultantes 04\_7grafico\_predi\_hist\_IES\_zoom\_perc\_UTS.

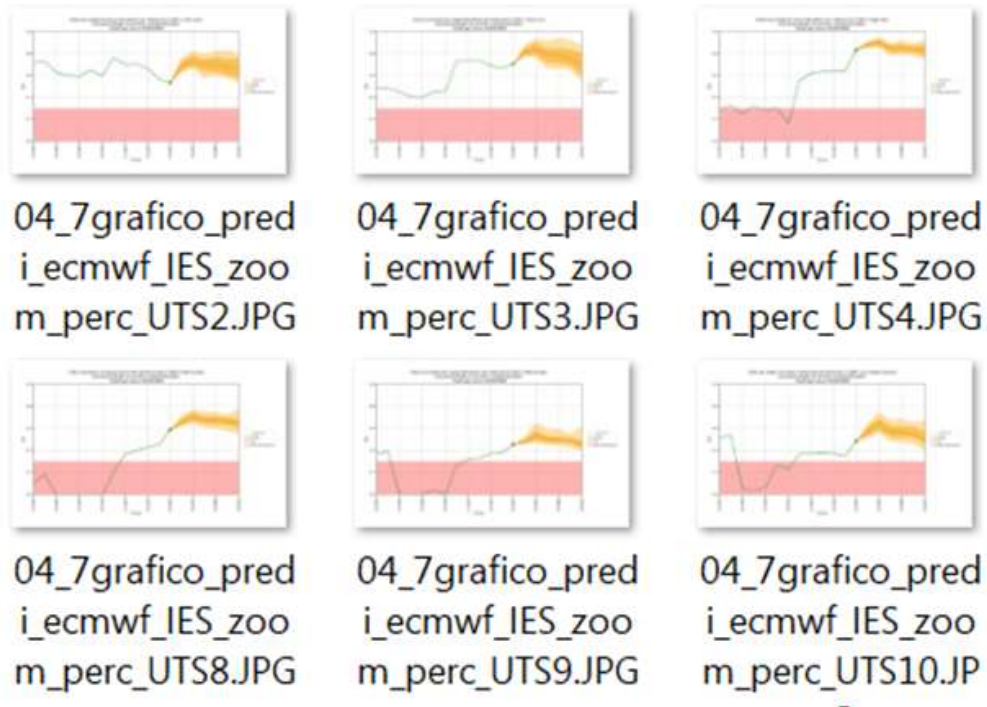


Tabla 1: "03\_3predic\_ecmwf\_IES", contiene el cálculo de la predicción estacional del Índice de Estado de Sequía prolongada con datos del ECMWF. El resultado abarca las 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), mostrando la evolución prevista del IES para cada una de ellas durante el periodo de predicción. La Tabla 11 muestra un fragmento inicial del documento resultante.

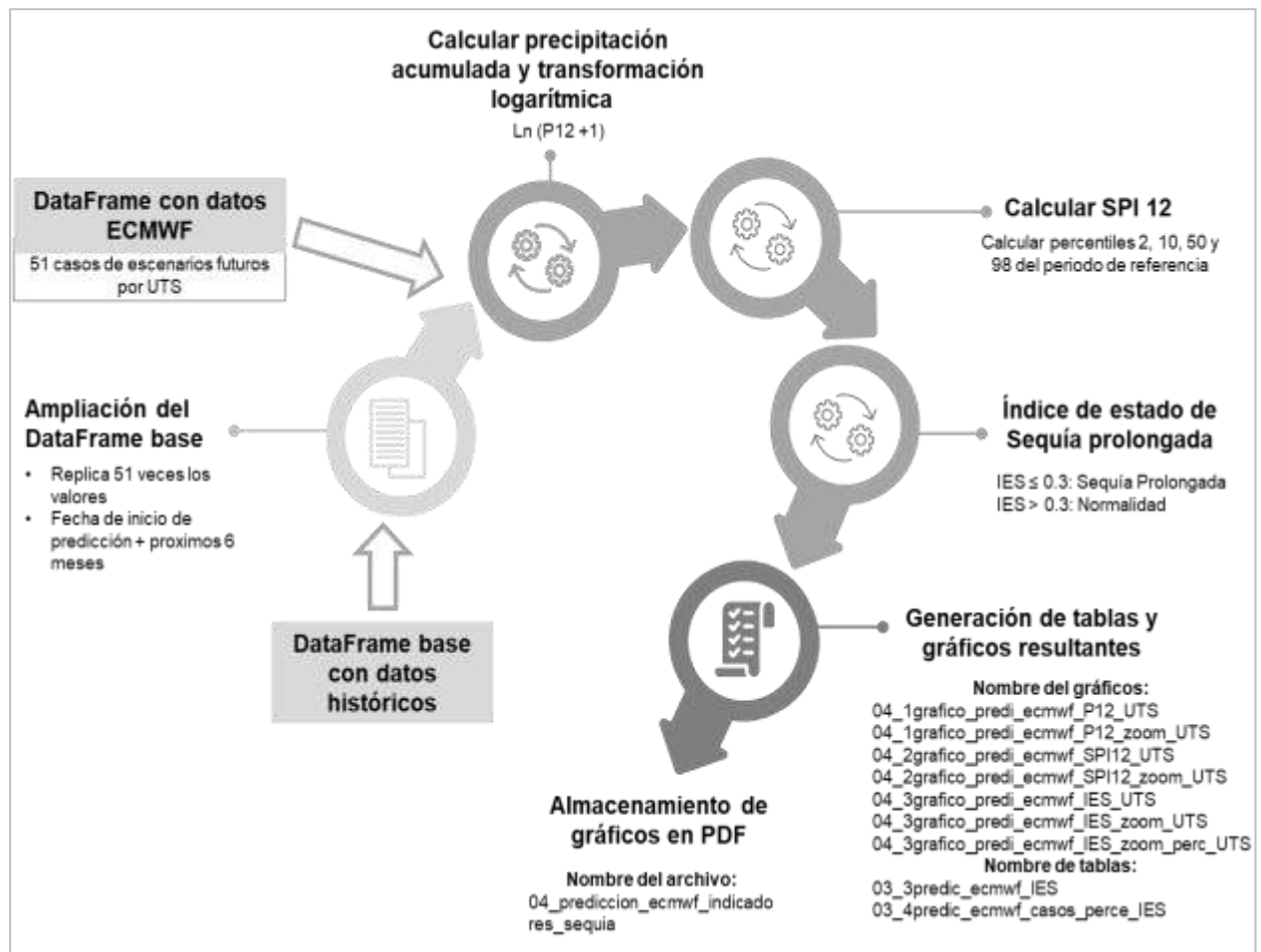
[illegible]

Tabla 12. Documento resultante 03 4predic ecmwf casos perce IES.

| codigo | fecha      | p30      | p75      | p50      | p25      | p03042   |
|--------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1      | 2025-04-01 | 0.74809  | 0.68626  | 0.647625 | 0.609434 | 0.503742 |
| 1      | 2025-05-01 | 0.816175 | 0.77465  | 0.725045 | 0.695377 | 0.626938 |
| 1      | 2025-06-01 | 0.740543 | 0.68594  | 0.63259  | 0.544722 | 0.498078 |
| 1      | 2025-07-01 | 0.756628 | 0.682521 | 0.636057 | 0.555224 | 0.505941 |
| 1      | 2025-08-01 | 0.750057 | 0.686479 | 0.617403 | 0.577027 | 0.4893   |
| 1      | 2025-09-01 | 0.764729 | 0.690878 | 0.59864  | 0.512275 | 0.471893 |
| 2      | 2025-04-01 | 0.757706 | 0.723788 | 0.689347 | 0.645796 | 0.622822 |
| 2      | 2025-05-01 | 0.821954 | 0.781563 | 0.721759 | 0.686368 | 0.640508 |
| 2      | 2025-06-01 | 0.793204 | 0.744373 | 0.690244 | 0.635332 | 0.580372 |
| 2      | 2025-07-01 | 0.810786 | 0.765801 | 0.700281 | 0.631657 | 0.593881 |
| 2      | 2025-08-01 | 0.828195 | 0.744321 | 0.671786 | 0.607095 | 0.573124 |
| 2      | 2025-09-01 | 0.79864  | 0.7535   | 0.66424  | 0.581603 | 0.537026 |
| 3      | 2025-04-01 | 0.877565 | 0.846024 | 0.810741 | 0.766023 | 0.737563 |
| 3      | 2025-05-01 | 0.925936 | 0.890721 | 0.837206 | 0.786309 | 0.763632 |
| 3      | 2025-06-01 | 0.912823 | 0.859523 | 0.789102 | 0.716412 | 0.695916 |
| 3      | 2025-07-01 | 0.936139 | 0.846138 | 0.78499  | 0.707029 | 0.662628 |
| 3      | 2025-08-01 | 0.917898 | 0.831861 | 0.757653 | 0.689324 | 0.647359 |
| 3      | 2025-09-01 | 0.873708 | 0.801139 | 0.698773 | 0.603946 | 0.546885 |
| 4      | 2025-04-01 | 0.908721 | 0.894345 | 0.87631  | 0.856794 | 0.849188 |
| 4      | 2025-05-01 | 0.939789 | 0.922502 | 0.897723 | 0.865935 | 0.851061 |
| 4      | 2025-06-01 | 0.893765 | 0.86959  | 0.845993 | 0.810056 | 0.789285 |
| 4      | 2025-07-01 | 0.915185 | 0.876357 | 0.845261 | 0.810269 | 0.79361  |
| 4      | 2025-08-01 | 0.889214 | 0.862817 | 0.831346 | 0.815996 | 0.780357 |
| 4      | 2025-09-01 | 0.916595 | 0.871425 | 0.82574  | 0.780694 | 0.747123 |

- La figura 44 muestra en síntesis el proceso realizado para calcular la predicción estacional del Índice de Estado de Sequía Prolongada con datos climáticos.

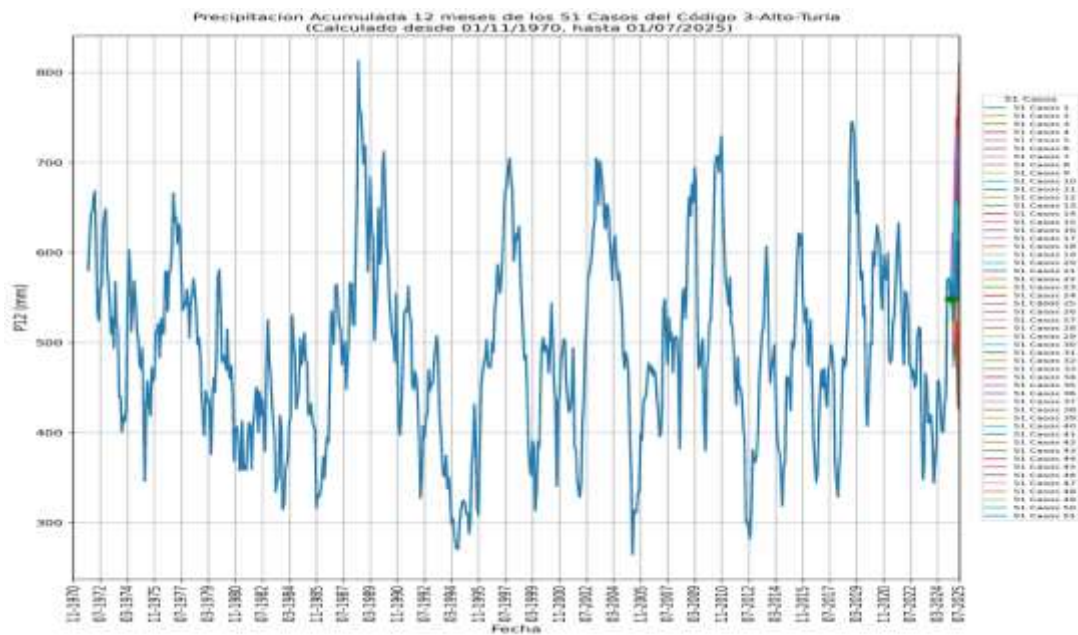
Figura 44. Diagrama de flujo del proceso de cálculo de la predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) con datos históricos.



A continuación, se muestran los gráficos resultantes de la predicción estacional del índice de Estado de Sequía generada mediante los 51 casos del modelo ECMWF. Los resultados se organizan en tres componentes principales:

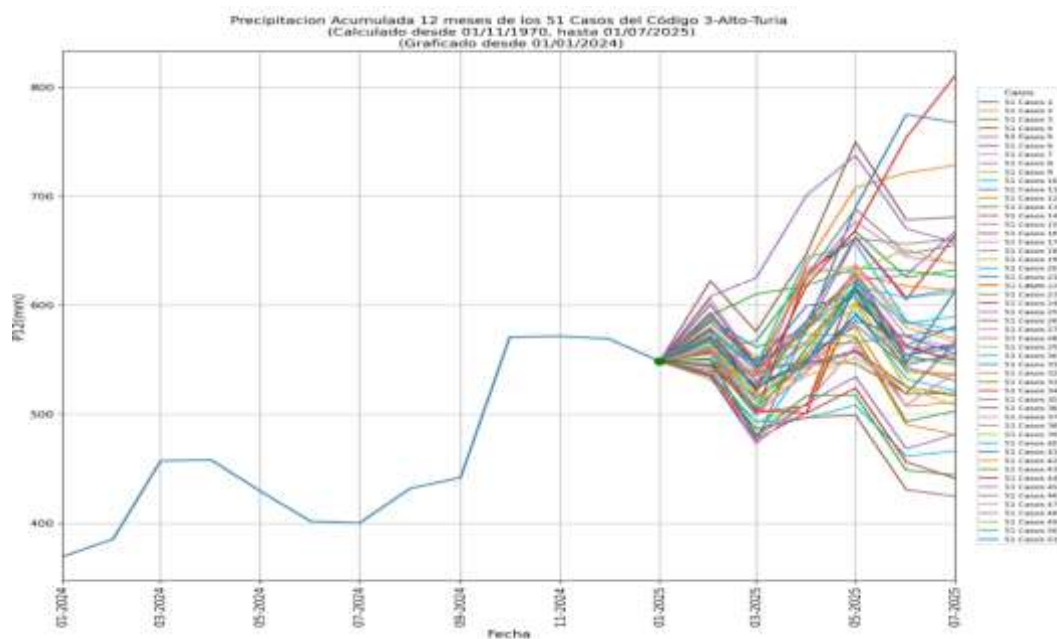
**Precipitación acumulada a 12 meses:** La figura 45 muestran la trayectoria de precipitación futura por los 51 casos del modelo.

Figura 45. Predicción de precipitación acumulada12 con datos del ECMWF.



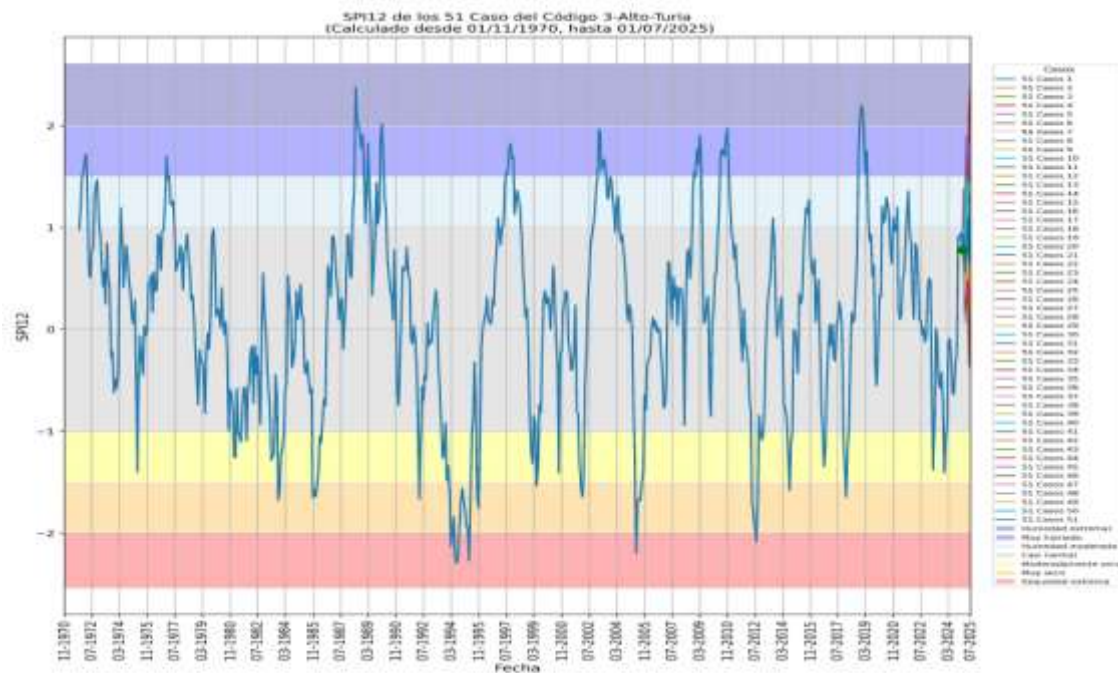
La figura 46 muestra la ampliación temporal para mejor visualización de los 6 meses para los cuales se realiza la predicción estacional.

Figura 46. Predicción de precipitación acumulada12 con datos del ECMWF.



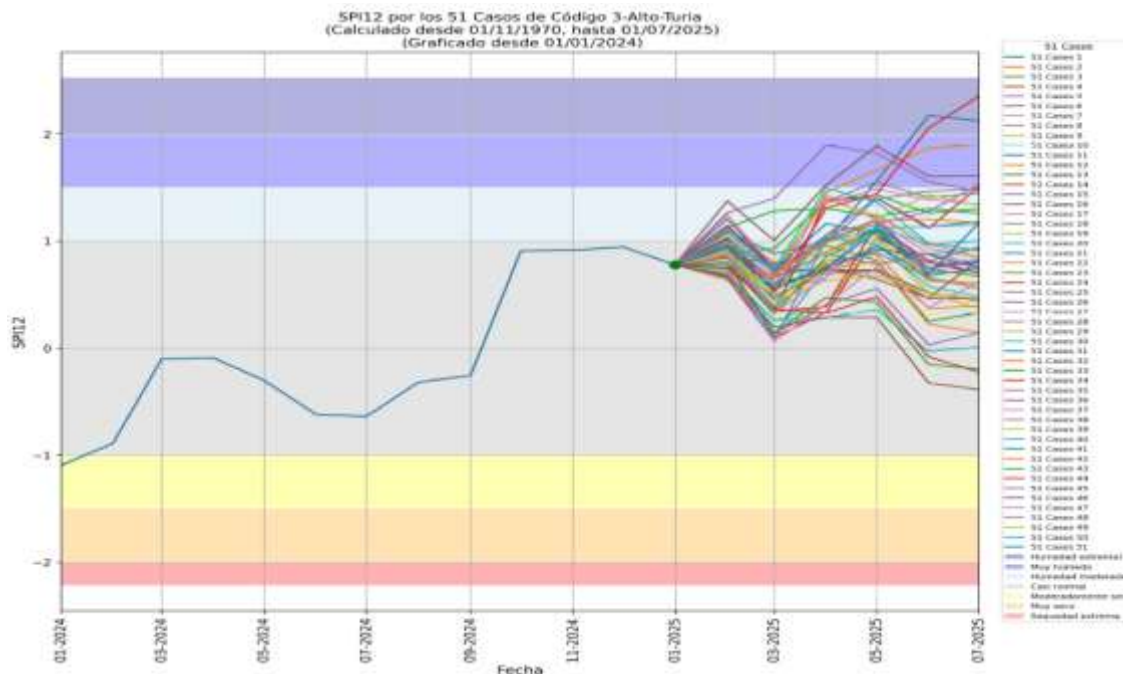
**SPI-12:** La figura 47 representación de la transformación logarítmica y estandarización de la precipitación acumulada a una distribución normal (media 0, desviación estándar

Figura 47. Predicción de SPI 12 con datos del ECMWF.



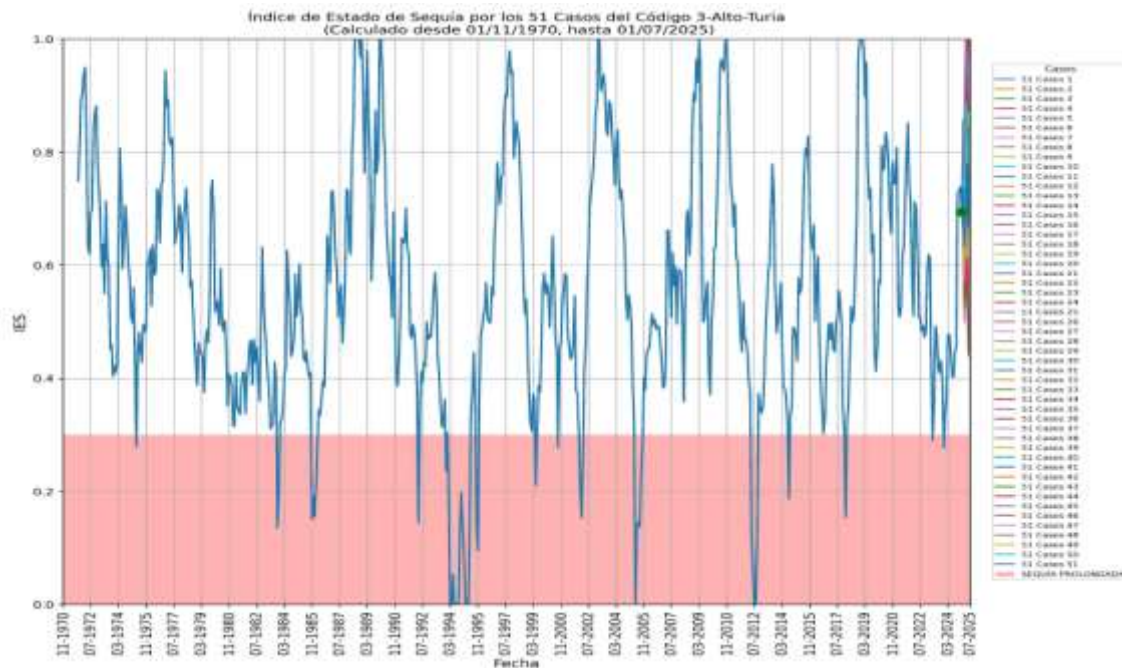
De igual manera, en la figura 48 se visualiza la ampliación temporal para mejorar la visualización.

Figura 48. Ampliación de la predicción de SPI 12 con datos del ECMWF.



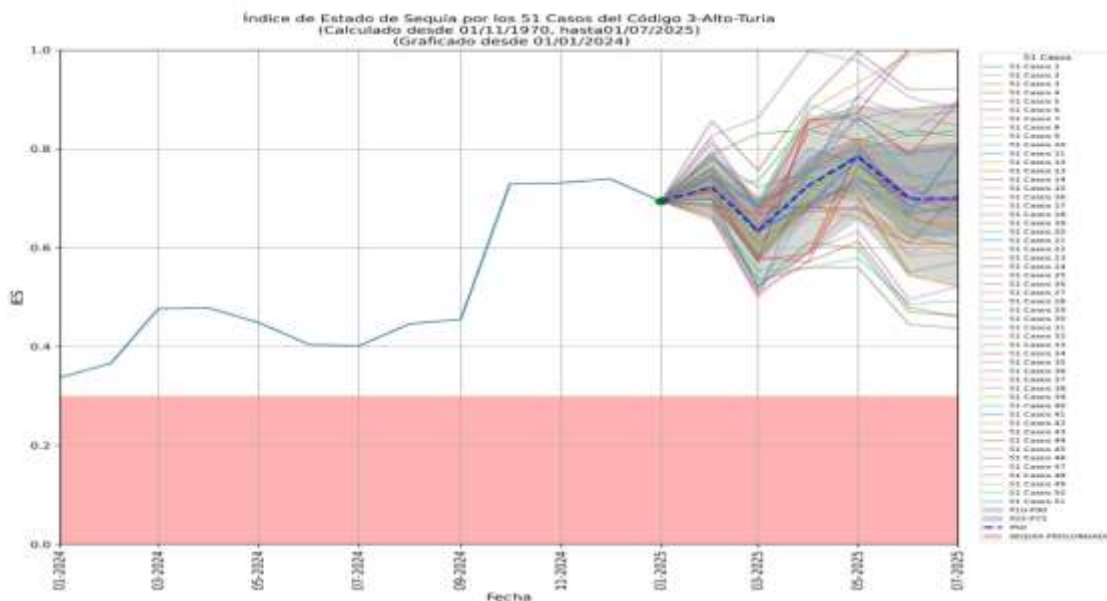
**IES:** En la figura 49 se visualizan de los 51 escenarios posibles del cálculo del Índice de Estado de Sequía, de color rojo se señala el umbral de sequía prolongada definido como 0.3.

Figura 49. Predicción del IES con datos del ECMWF.



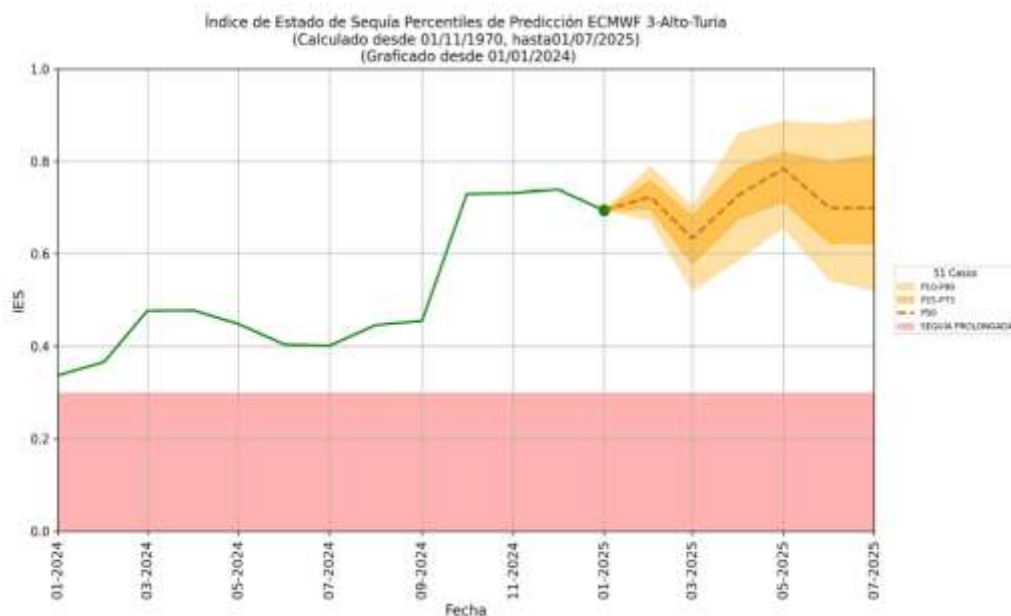
En la figura 50 se visualiza la ampliación de la predicción realizada con los 51 posibles escenarios y se muestra en escala de grises los percentiles claves (P2, P10, P50, P90, P98).

Figura 50. Ampliación de la predicción del IES con datos del ECMWF.



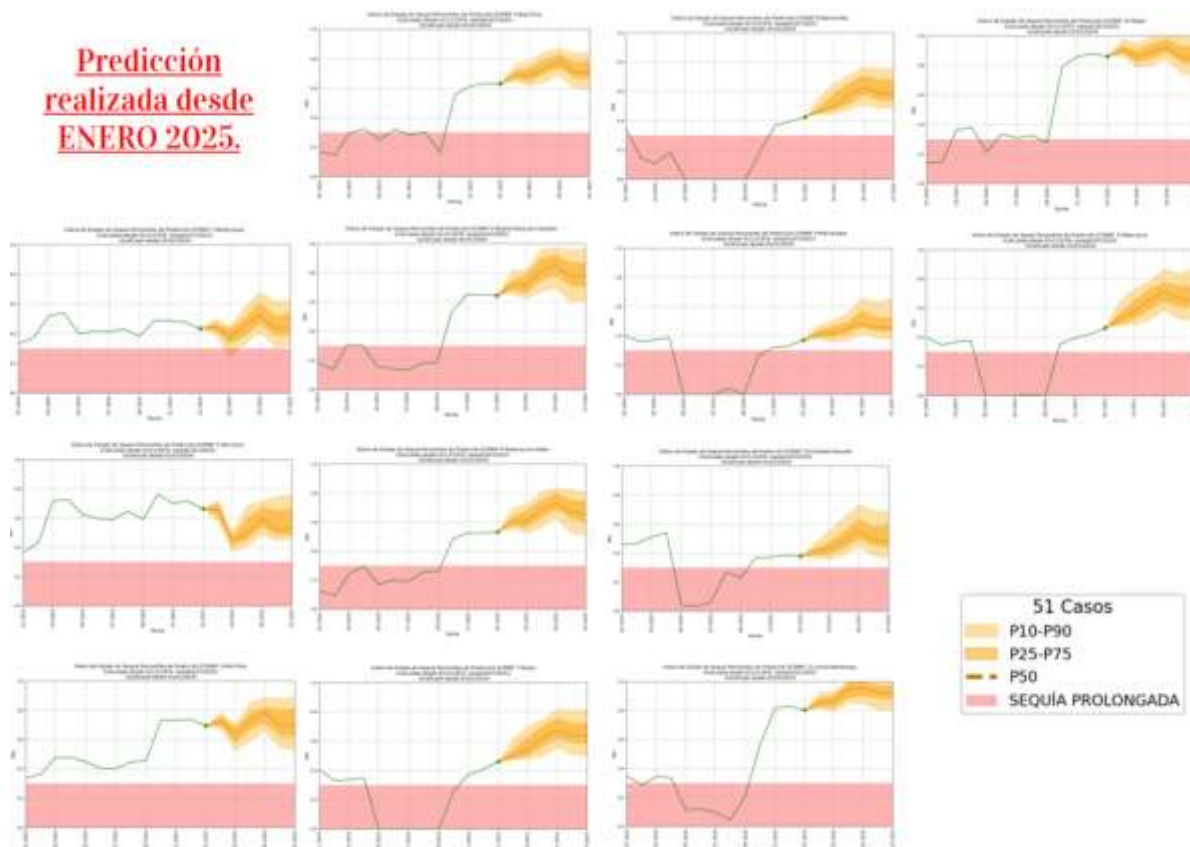
Adicionalmente, en la figura 51 se muestra una versión simplificada de la predicción realizada, mostrando únicamente los rangos de los percentiles para una visión clara de la variabilidad esperada.

Figura 51. Resultados gráficos de la predicción del IES (rangos percentiles) con datos del ECMWF.



Para visualizar la efectividad del modelo realizado la figura 52 muestra la predicción del Índice de Sequía Prolongada con datos del ECMWF, la cual está calculada desde el mes de enero 2025 hasta julio 2025.

Figura 52. Predicción del IES con datos del ECMWF de las 13 UTS.



### **5.3.3 Predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) combinando datos históricos y datos del ECMWF**

En este apartado se presenta la integración general de los dos enfoques de predicción: uno basado en datos históricos y otro en escenarios del ECMWF. Ambas metodologías se combinan a partir de una fecha de inicio común para calcular y comparar indicadores clave como la precipitación acumulada, el SPI-12 y el IES. Esta estrategia metodológica permite visualizar, en un mismo gráfico, la evolución histórica y los posibles escenarios futuros, facilitando la comparación entre métodos. Los resultados obtenidos mediante esta metodología se presentan y analizan en el apartado 5.6.

## 5.4 GESTIÓN DE ARCHIVOS RESULTANTES

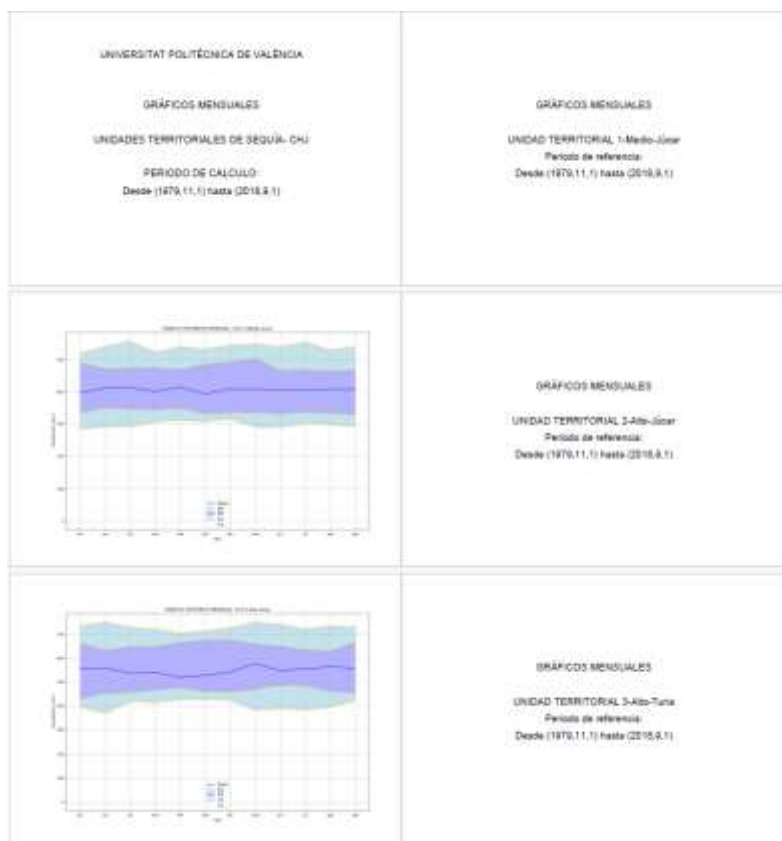
La gestión adecuada de los archivos generados es fundamental para asegurar la trazabilidad, consulta eficiente y análisis posterior de los resultados obtenidos en el proyecto. Los gráficos y resultados numéricos derivados de cada Unidad Territorial de Sequía (UTS) se recopilan y estructuran en informes PDF, organizados según su contenido y finalidad.

A continuación, se describen los principales archivos PDF generados por el programa, especificando su contenido y utilidad:

- **Estadísticos medios mensuales:**

"01\_estadis\_medio\_mensual", este archivo PDF recopila los valores estadísticos calculados para la serie de referencia de precipitación en cada Unidad Territorial de Sequía. Incluye, para cada mes, la media y los principales percentiles de la precipitación acumulada, así como gráficos que permiten visualizar la variabilidad y el comportamiento histórico de la serie.

*Figura 53. PDF resultante, Estadísticos mensuales.*



- **IES Histórico:**

"02\_serie\_hist\_indicadores\_sequia", este archivo PDF presenta las series temporales históricas de los indicadores utilizados para la obtención del Índice de Estado de Sequía (IES) en cada Unidad Territorial de Sequía (UTS). Incluye la precipitación acumulada a 12 meses (P12) y el Índice Estandarizado de Precipitación a 12 meses (SPI-12), que constituyen las bases para el cálculo del IES. Los gráficos muestran la evolución mensual de estas variables desde 1980 hasta enero de 2025

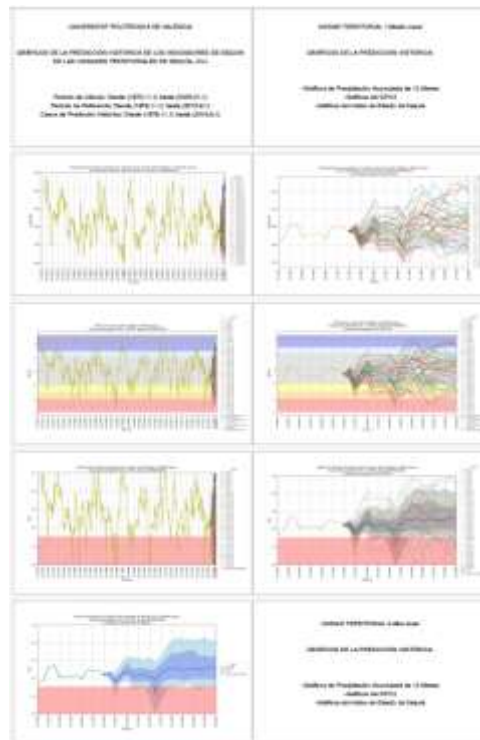
*Figura 54. PDF resultante, IES histórico.*



- **Predicción del IES con datos históricos:**

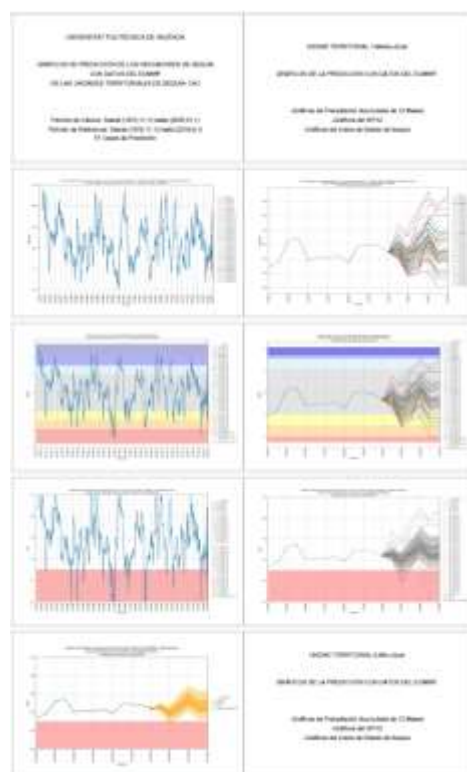
"03\_prediccion\_hist\_indicadores\_sequia", este documento presenta los gráficos de predicción del Índice de Estado de Sequía (IES) obtenidos a partir del análisis de 39 casos históricos seleccionados. Los gráficos muestran la evolución esperada del IES en los meses siguientes, utilizando como referencia el comportamiento registrado en esos años análogos que incluye los gráficos de predicción basados en los 39 casos históricos.

Figura 55. PDF resultante, Predicción con datos históricos.



- Predicción del IES con datos del ECMWF:**  
 “04\_prediccion\_ecmwf\_indicadores\_sequia”, que presenta los resultados de predicción basados en los 51 posibles casos del ECMWF.

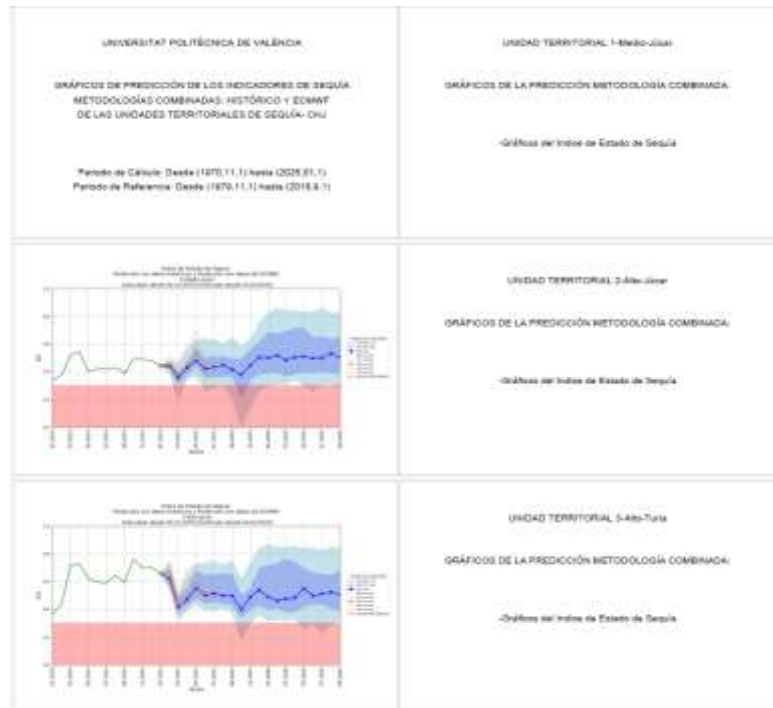
Figura 56. PDF resultante, Predicción con datos ECMWF.



- **Predicción del IES combinando datos históricos y datos del ECMWF**

“05\_prediccion\_combinada\_indicadores\_sequia”, este archivo muestra un solo gráfico como recopilación de las dos metodologías utilizadas para generar las predicciones estacionales.

*Figura 57. PDF resultante, Predicción combinada.*



La organización sistemática de estos archivos no solo facilita la consulta individual de los resultados para cada Unidad Territorial de Sequía, sino que también permite realizar un seguimiento comparativo y temporal de los distintos escenarios analizados.

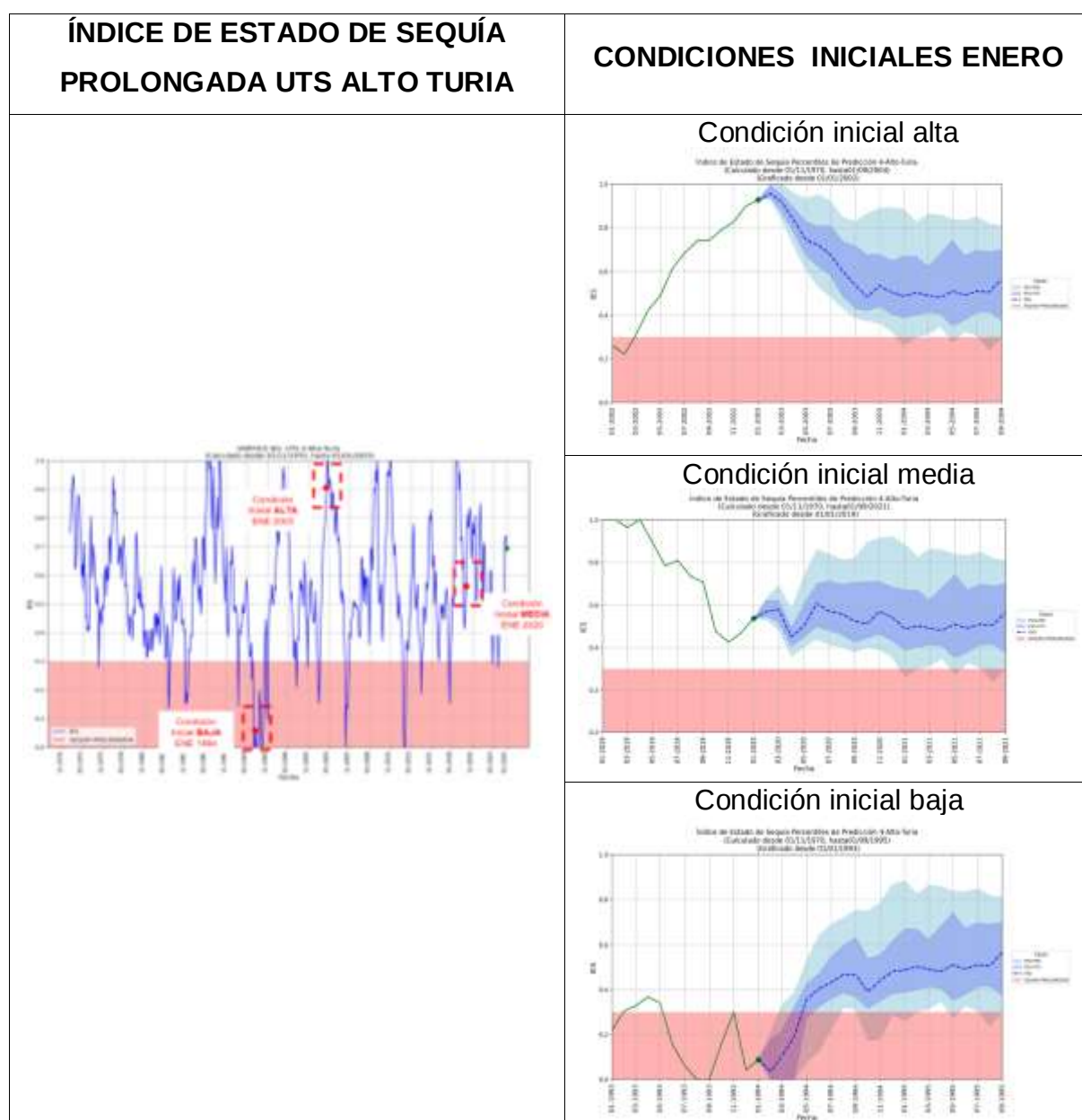
Esta estructura documental contribuye a una mayor eficiencia en el análisis posterior, ya que cada informe PDF contiene información detallada y específica sobre los indicadores y predicciones generadas, adaptándose a las necesidades de los gestores y responsables técnicos. Además, el almacenamiento ordenado de los gráficos y resultados asegura la trazabilidad del proceso metodológico y respalda la toma de decisiones en la gestión de la sequía, permitiendo identificar rápidamente tendencias, anomalías o patrones relevantes en función de los diferentes enfoques aplicados en cada bloque metodológico.

## 5.5 ANÁLISIS DE LA PREDICCIÓN

El análisis de la predicción se basó en dos experimentos, suponiendo que la predicción se realiza en diferentes condiciones iniciales diferenciadas, seleccionando tres escenarios representativos. El primer experimento, cumple el siguiente detalle:

- ◆ Condición inicial baja (CI baja): enero de 2003 (IES= 0.88, normalidad).
- ◆ Condición inicial neutra (CI neutra): enero de 2020 (IES= 0.57, normalidad).
- ◆ Condición inicial alta (CI alta): enero de 1995 (IES= 0.092, Sequía prolongada).

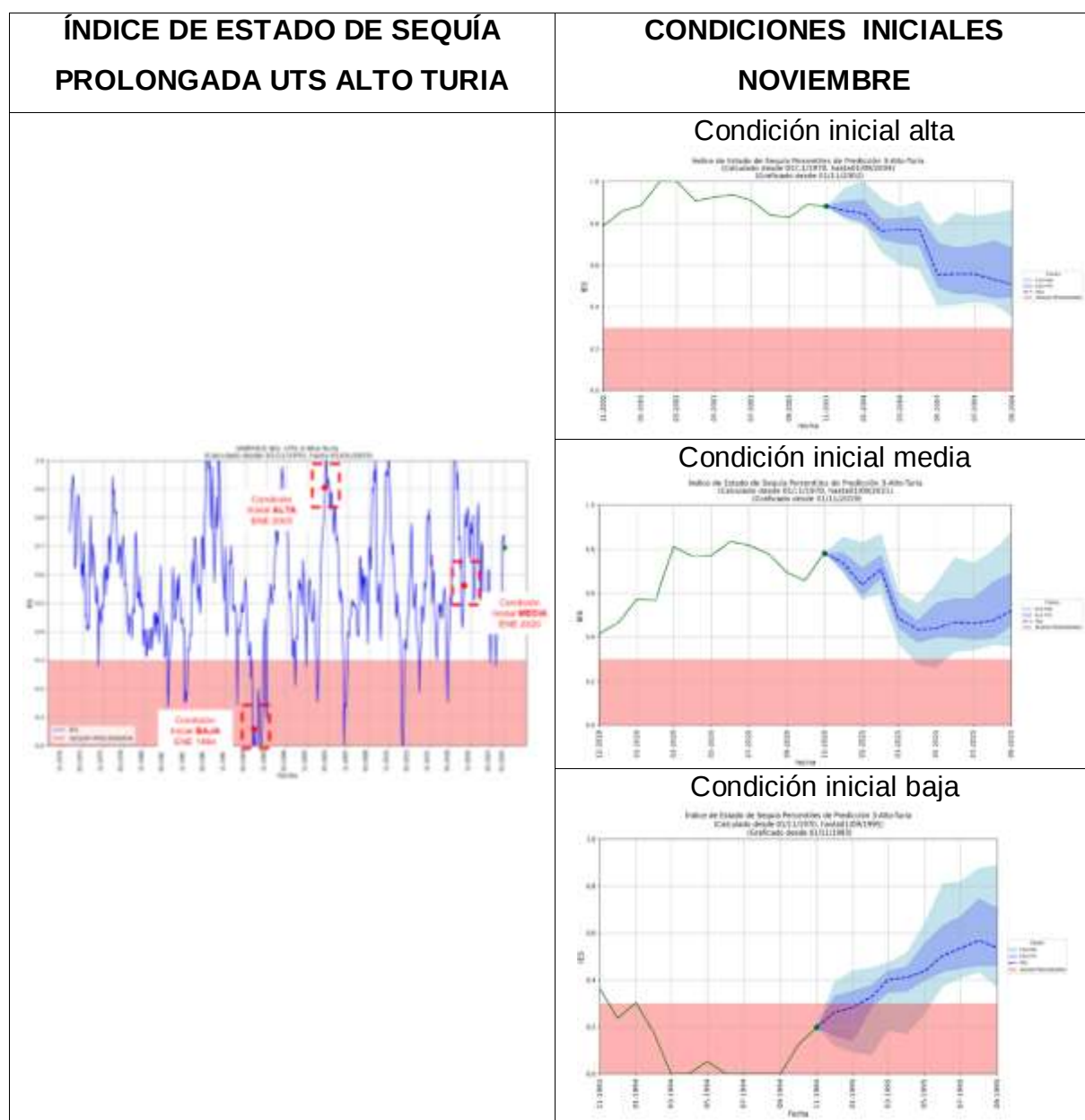
Tabla 13. Primer experimento de condiciones iniciales diferentes, mes enero.



Mientras que el segundo experimento se realizó para el mes de noviembre en diferentes años:

- ♦ Condición inicial baja (CI baja): noviembre de 2003 (IES= 0.88, normales).
- ♦ Condición inicial neutra (CI neutra): noviembre de 2020 (IES= 0.78, normalidad).
- ♦ Condición inicial alta (CI alta): noviembre de 1994 (IES= 0.19, Sequía prolongada).

Tabla 14. Segundo experimento de condiciones iniciales diferentes, mes noviembre.



En los dos casos experimentales se obtiene que la condición inicial alta muestra una tendencia descendente hacia valores neutros, explicada por la sustitución progresiva de meses extremadamente húmedos por valores cercanos a la media histórica. La condición inicial media refleja una estabilidad en las predicciones, al partir de condiciones cercanas a la normalidad. Finalmente, en la condición inicial baja se observa una tendencia ascendente hacia la media, asociada al reemplazo de meses secos extremos por valores típicos de la serie de referencia.

Este comportamiento responde al principio estadístico de regresión a la media, donde los valores extremos iniciales tienden a converger hacia la media histórica al incorporar nuevos datos dentro del rango de variabilidad natural del sistema.

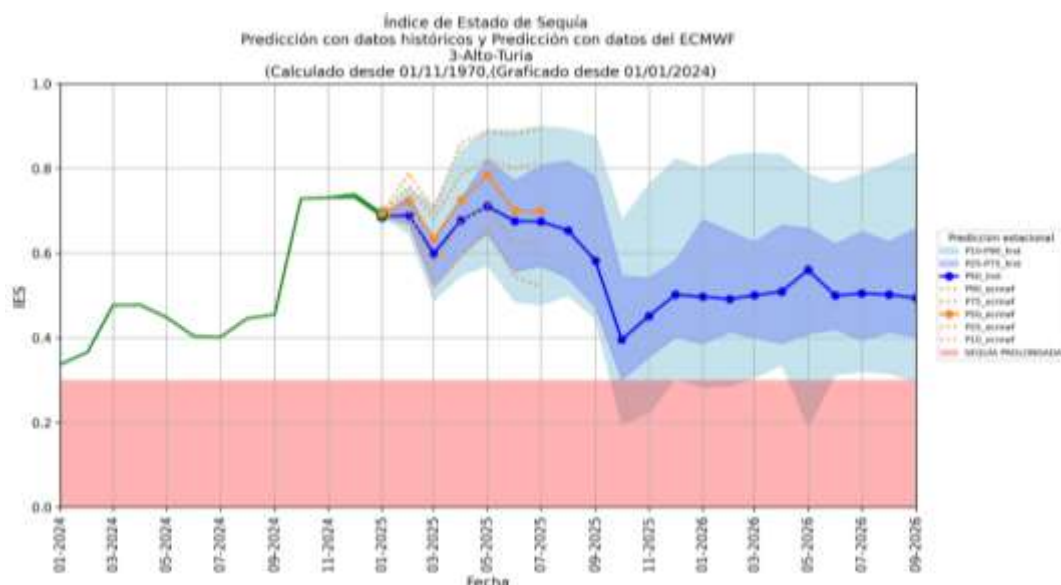
## 5.6 RESULTADOS FINALES

Los resultados finales de la predicción estacional de los Indicadores de Sequía Prolongada (IES) mediante la metodología combinada se presentan en este apartado. Se evalúa el comportamiento predictivo del IES en las 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS) de la Demarcación del Júcar, integrando proyecciones basadas en datos históricos (con un horizonte de 1 a 2 años hidrológicos) y escenarios del ECMWF (6 meses). A través de gráficos comparativos y análisis de percentiles, se contrastan ambas fuentes de predicción. Los ejercicios realizados desde enero y marzo de 2025 permiten validar la robustez del modelo en distintos momentos del ciclo hidrológico, evidenciando la capacidad del sistema para combinar perspectivas temporales complementarias en la gestión de sequías.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos:

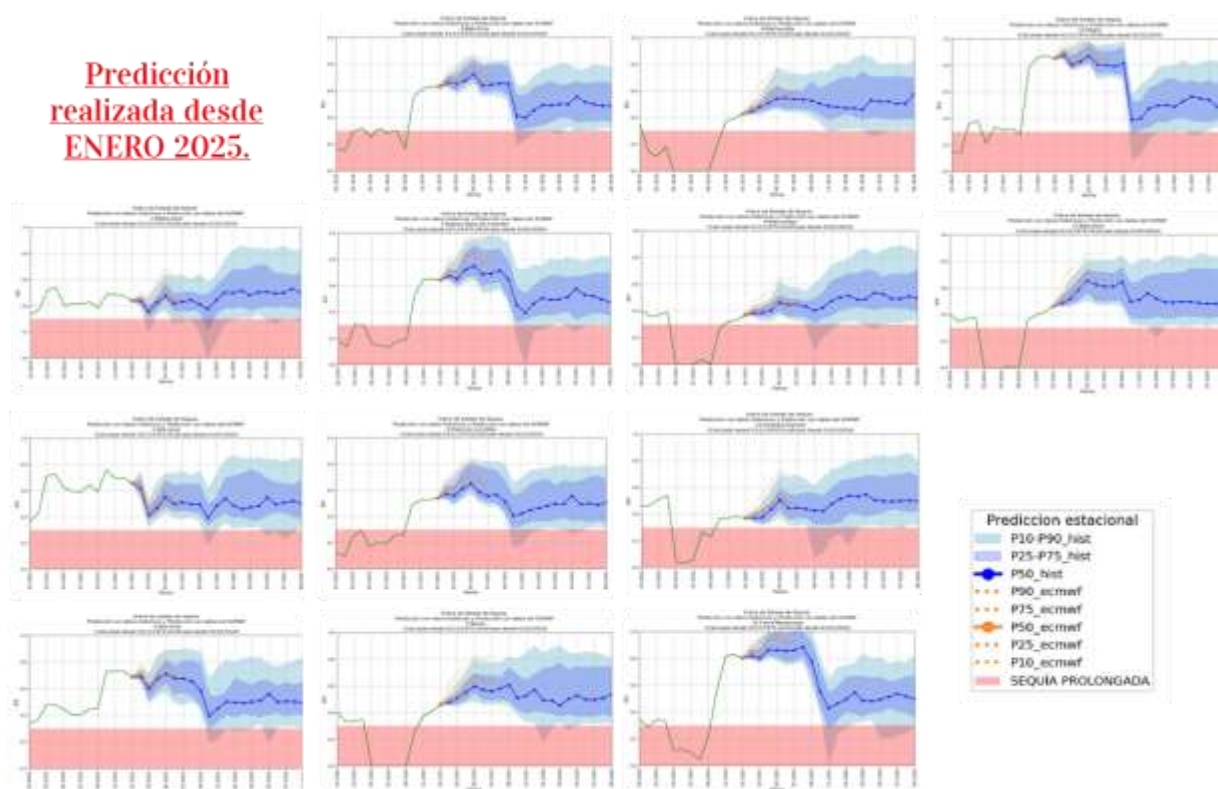
La figura 58 muestra la unión de las dos metodologías realizadas. Los colores de escala azul corresponden a la predicción realizada con datos históricos hasta finales del siguiente año hidrológico (septiembre 2026), mientras que las líneas amarillas corresponden a la predicción con datos del Centro Europeo realizado 6 meses posteriores a la fecha de análisis.

*Figura 58. Metodología combinada, predicción desde enero 2025 del IES UTS Alto Turia.*



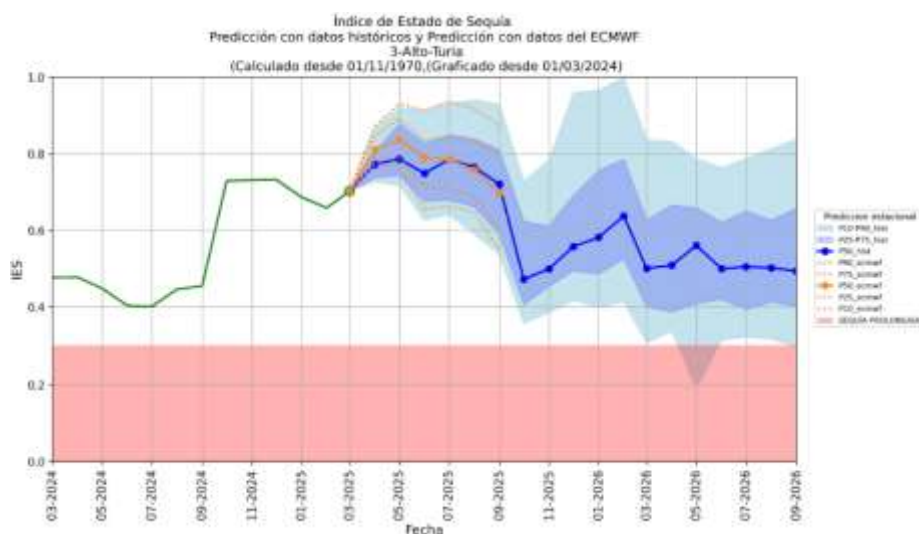
En la figura 59 se muestra la predicción del Índice de Sequía Prolongada con las dos metodologías de predicción, tanto con datos históricos como con datos del ECMWF.

Figura 59. Metodología combinada, predicción desde enero 2025 para predicción del IES de las 13 UTS.



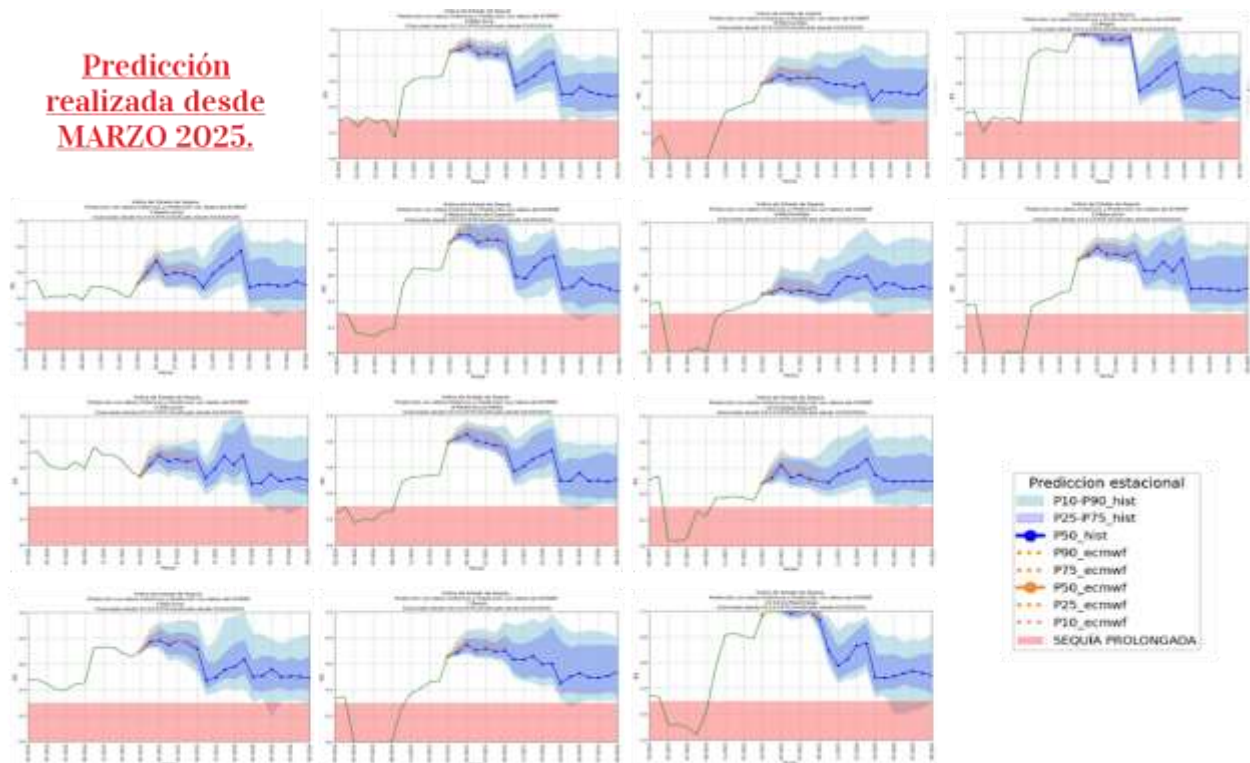
Con el objetivo de comprobar la efectividad y robustez del programa desarrollado, y por motivos prácticos, se ha añadido un nuevo ejercicio de predicción realizado desde marzo de 2025 para la UTS Alto Turia. Este ejemplo adicional permite evaluar el comportamiento y la capacidad comparativa del modelo en distintos momentos del año hidrológico, reforzando la validez de la metodología combinada.

Figura 60. Metodología combinada, predicción desde marzo 2025 del IES UTS Alto Turia.



Además, en la figura 61, se presentan los resultados de la predicción correspondiente a las 13 Unidades Territoriales de Sequía (UTS), lo que proporciona una visión global y detallada de la aplicación del programa en toda la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

*Figura 61. Metodología combinada, predicción desde marzo 2025 para predicción del IES de las 13 UTS.*



El desarrollo completo de los resultados y el análisis pormenorizado de cada UTS pueden consultarse en el Anexo 1 y 2.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha desarrollado e implementado una metodología para la predicción estacional de indicadores de sequía en la Demarcación Hidrográfica del Júcar. El proceso ha abarcado la recopilación, tratamiento y análisis de series históricas de precipitación, la aplicación de índices como el SPI-12 y el cálculo del Índice de Estado de Sequía Prolongada (IES) para cada Unidad Territorial de Sequía (UTS). Se ha diseñado y programado un software en Python que automatiza la generación de informes PDF, gráficos y tablas para cada UTS, integrando tanto métodos de predicción basados en análogos históricos como en modelos climáticos estacionales (ECMWF). Este sistema permite obtener escenarios de evolución futura del IES, facilitando la comparación entre métodos y la estimación de la incertidumbre asociada a cada predicción.

La metodología y las herramientas desarrolladas se integran directamente en los procedimientos y requerimientos establecidos por el nuevo Plan Especial de Sequía (PES) de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. La predicción estacional de los indicadores de sequía, tal como exige el PES, permite anticipar la evolución de la situación hidrológica y mejorar la capacidad de respuesta ante episodios de sequía prolongada, facilitando la activación de medidas preventivas y la actualización de los escenarios de gestión adaptativa. Además, la automatización y sistematización del proceso favorecen la trazabilidad y la transparencia en la aplicación, facilitando su revisión y adaptación continua.

La integración de la predicción estacional de los indicadores de sequía en la gestión hidrológica de la Demarcación Hidrográfica del Júcar supone un avance relevante en el cumplimiento de la normativa y en la alineación con las recomendaciones nacionales y europeas sobre gestión adaptativa. La metodología desarrollada, basada en el cálculo y predicción del Índice de Estado de Sequía Prolongada (IES), ha demostrado ser robusta y versátil, permitiendo su aplicación en las 13 Unidades Territoriales de Sequía de la cuenca y facilitando la caracterización tanto histórica como prospectiva de la sequía.

El software desarrollado en Python constituye una herramienta eficaz y flexible, capaz de realizar la predicción estacional de los indicadores para todas las unidades

territoriales. Este sistema automatiza la generación de tablas, gráficos e informes, y permite al usuario definir el periodo de cálculo, el periodo de referencia y el periodo de predicción, adaptándose así a diferentes necesidades de gestión y escenarios de análisis. La estructura modular del programa facilita su actualización y transferencia a otras cuencas con problemáticas similares.

La fiabilidad de las predicciones depende en gran medida del conjunto de casos utilizados para la simulación, lo que determina tanto la horquilla de resultados posibles como la probabilidad de ocurrencia de los distintos escenarios. Además, se ha comprobado que el punto de inicio de la predicción influye significativamente en la dirección y forma de la campana de predicción histórica, aspecto que debe considerarse para una correcta interpretación de los resultados.

El uso combinado de datos históricos y modelos climáticos estacionales mejora la capacidad de anticipación y reduce la incertidumbre en la toma de decisiones, proporcionando a los gestores un marco más completo y adaptativo.

La experiencia práctica en la cuenca del Júcar confirma la viabilidad, utilidad y transferibilidad de estas metodologías, y recalca la importancia de la colaboración entre organismos de cuenca, centros de investigación y servicios meteorológicos para crear herramientas en busca de la gestión más resiliente y eficaz.

Finalmente, la incorporación de sistemas de indicadores y modelos de previsión en los informes periódicos de seguimiento contribuye a una gestión más anticipativa y alineada con los retos derivados del cambio climático, reforzando la necesidad de seguir desarrollando herramientas predictivas y de integrar la información climática en la planificación hidrológica.

## 7. LÍNEAS FUTURAS

- Evaluar la calidad de la predicción: Es fundamental analizar la fiabilidad y precisión de las predicciones estacionales generadas por el software, utilizando métricas objetivas y validaciones cruzadas con datos observados.
- Aplicar la metodología al Índice de Estado de Escasez Coyuntural, extender la metodología y el software implementados para la predicción del Índice de Estado de Sequía Prolongada (IES) al Índice de Estado de Escasez Coyuntural (IEE). Esto permitiría abordar de manera integral tanto la sequía meteorológica como la escasez operativa, alineándose con la tendencia normativa y técnica de emplear sistemas de indicadores diferenciados para mejorar la gestión y la toma de decisiones en situaciones de sequía

## 8. REFERENCIAS

Bretherton, C. S., Smith, C., & Wallace, J. M. (1992). An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *Journal of Climate*, 5(6), 541–560.

Comisión Europea. (2007). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo: Afrontar el desafío de la escasez de agua y la sequía en la Unión Europea (COM(2007) 414 final).

Comisión Europea. (2012). Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Informe sobre la revisión de la política europea de lucha contra la escasez de agua y la sequía (COM(2012) 672 final). Bruselas.

Comisión Europea. (2013). Estrategia de la UE sobre adaptación al cambio climático (COM(2013) 216 final).

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2007). *Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar*. Valencia: Confederación Hidrográfica del Júcar.

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2018). *Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2018-2024*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2024). *Propuesta de proyecto de revisión del Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*. Documento sometido a consulta pública.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 327, 22 de diciembre de 2000, 1–73.

Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., & Castelli, F. (1992). Temporal and spatial variability in the propagation of hydrologic anomalies. *Journal of Climate*, 5(6).

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (s.f.). ECMWF Data. ECMWF. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>

Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F. J., & Palmer, T. N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting – I. Basic concept. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 57A(3), 219–233.

Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C. M., LaRow, T. E., Bachiochi, D. R., Zhang, Z., Williford, C. E., Gadgil, S., & Surendran, S. (1999). Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 285.

Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 161, 6 de julio de 2001.

Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 121, 21 de mayo de 2021.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society.

Mehran, A., Mazdiasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(1), 1–13. <https://doi.org/10.1002/2015JD023147>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *Predicción hidrológica para las aportaciones acumuladas*. MITECO. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/prediccion-estacional/sistema-prediccion-hidrologica-estacional-ch-intercomunitarias.html>

Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23/24, 67–77.

Necco Carlomagno, G. V., & Aiello, J. L. (2021). Sequías: antecedentes, tratamiento e impacto en el sector agropecuario argentino. *Bolsa de Comercio de Rosario. Revista Institucional*, N° 1542, 25 de octubre de 2021.

Observatorio Europeo de la Sequía (European Drought Observatory, EDO). (2012). European Commission, Joint Research Centre.

Palmer, W. C. (1965). Meteorological Drought (Research Paper No. 45). U.S. Weather Bureau.

Ravelo, A. C., Sanz Ramos, R., & Douriet Cárdenas, J. C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia*, 31(1), 11–24.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 176, 24 de julio de 2001.

Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. *Boletín Oficial del Estado*, núm. 162, 7 de julio de 2007.

Shukla, S., & Lettenmaier, D. P. (2011). Seasonal hydrologic prediction in the United States: Understanding the role of initial hydrologic conditions and

seasonal climate forecast skill. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3529–3538. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3529-2011>

Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359–392.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.

World Meteorological Organization. (2021). *Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction* (WMO-No. 1274). Geneva: WMO.

World Meteorological Organization. (2024). *Report on seasonal climate prediction*. Geneva: WMO.

Yuan, X., Wood, E. F., & Ma, Z. (2015). A review on climate-model-based seasonal hydrologic forecasting: Physical understanding and system development. *WIREs Water*, 2(5), 523–536. <https://doi.org/10.1002/wat2.1088>

## **ANEXOS**

1. PREDICCIÓN ESTACIONAL DE LOS INDICADORES DE SEQUÍA PROLONGADA A PARTIR DE ENERO DE 2025 PARA LAS 13 UNIDADES TERRITORIALES DE SEQUÍA.
2. PREDICCIÓN ESTACIONAL DE LOS INDICADORES DE SEQUÍA PROLONGADA A PARTIR DE MARZO DE 2025 PARA LAS 13 UNIDADES TERRITORIAS DE SEQUÍA.