



Tendencias en datos de monitoreo ambiental y salud pública: análisis práctico con apoyo de inteligencia artificial

Manual de Entrenamiento

Jorge Zavatti

(jorgezavatti@gmail.com)(www.saludambiental.org)

Julio/2026

Agradecimientos:

Un sincero reconocimiento a los colegas socios de la SIBSA, las licenciadas Luciana Antolini y Giselle Della Rosa que revisaron el manuscrito de este documento, así como al doctor José María Ordoñez Iriarte por sus observaciones al documento y aportes de datos para el Caso #3.

Índice

1. Introducción	3
2. Métodos	4
Procedimiento para el Análisis de Tendencia de Mann-Kendall	4
Procedimiento para el cálculo de la Pendiente de Sen	5
Procedimiento para el cálculo del Tau de Kendall	6
3. Casos Complejos. Aplicación de la IA	7
Caso #1 - Especificación	7
Caso #1 – RESULTADOS	9
Caso #2 – Especificación	14
Caso #2 – RESULTADOS	15
Caso #3 – Especificación	19
Caso #3 – RESULTADOS	20
Resultados ANEXOS AL CASO #3	24
4. Sugerencias para considerar respecto de los datos, los prompt y los reportes de resultados de la IA	28
5. Referencias bibliográficas	30

Zavatti, Jorge Rubén

Tendencias en datos de monitoreo ambiental y salud pública : análisis práctico con apoyo de inteligencia artificial : manual de entrenamiento / Jorge Rubén Zavatti. - 1a edición especial. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : SIBSA, 2026.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-631-90079-5-4

1. Salud Pública. 2. Ambiente. 3. Medio Ambiente. I. Título.

CDD 344.046

ISBN 978-631-90079-5-4



1. Introducción

La vigilancia de la salud ambiental de las comunidades requiere prestar atención a la evolución temporal de algunos indicadores que permiten seguir el comportamiento de determinantes ambientales y/o económico-sociales de la salud. Tal es el caso de variables que representan a la calidad del aire o del agua a la que se exponen los colectivos sociales, la epidemiología de algunas enfermedades, las variables económicas que determinan el acceso a los sistemas de salud de los diferentes grupos de la sociedad.

En este marco el monitoreo de indicadores es práctica corriente en las administraciones locales o regionales. Se coleccionan datos que cubren parámetros muy diversos que van desde la concentración media diaria, mensual o anual en aire ambiente de material particulado ($PM_{2.5}$, por ejemplo) hasta la capacidad adquisitiva del salario promedio de los trabajadores o las concentraciones de bacterias en el agua de piscinas públicas.

Para algunos indicadores se han establecido valores o rangos de referencia mediante leyes o recomendaciones, frente a los cuales comparar los valores que se van registrando. Es decir, se verifica si el indicador cumple o no con la referencia aplicable. No obstante, para los técnicos en salud ambiental, así como para otros gestores de procesos o administración de políticas públicas, resulta de interés evaluar tendencias temporales en los valores de los indicadores que reflejan el desempeño de los programas/proyectos que llevan adelante.

Este breve Manual se propone entonces compartir algunas herramientas estadísticas simples, y a la vez robustas, para el análisis de tendencias de conjuntos de datos resultantes del monitoreo de indicadores durante un cierto período de tiempo. Las herramientas estadísticas que se utilizarán en este manual son tres: i) El Análisis de Tendencia de Mann-Kendall; ii) La Pendiente de Sen y; iii) El Tau de Kendall. Las bases de los tres procedimientos se expondrán en la sección siguiente utilizando un ejemplo sencillo.

Luego (ítem 3.), se realizarán análisis de tendencias sobre casos más complejos tomando tres casos de monitoreos de indicadores ambientales reales, utilizando los resultados que produce un “prompt” o solicitud a presentar en aplicaciones de inteligencia artificial (IA) de acceso libre. Solicitud esta que se pone a disposición de los usuarios de este documento. Finalmente (ítem 4.), se compartirán algunas sugerencias respecto del cómo modificar los prompt/solicitudes y la revisión de los resultados reportados por las aplicaciones de IA que se utilicen.

Competencias a adquirir: Al finalizar la interacción con este documento, el lector interesado podrá identificar si una serie temporal de datos de monitoreo presenta una tendencia significativa, aun cuando el conjunto de valores presente estacionalidad,

estimar la magnitud del cambio anual, mensual o del lapso de tiempo que se determine en función de los datos objeto de estudio, reconocer valores atípicos, interpretar resultados generados por la IA y redactar conclusiones o recomendaciones útiles para la gestión de programas o proyectos que administra.

2. Métodos

El caso simple cuyo análisis se desarrollará en este ítem, permite visualizar los procedimientos de cálculo utilizados en el análisis de tendencia, y tiene por objeto fortalecer la confianza de los usuarios en los resultados que reporte la IA en casos más complejos. Se tratarán en este ejemplo sencillo datos de promedio anual de caudales de un río:

Fecha/Año	2001	2003	2004	2008	2010
Caudal Promedio (m ³ /seg)	63,4	58,3	60,1	37,3	37,3

Observaciones: i) Si bien es conveniente que los datos a analizar se encuentren igualmente espaciados en sentido temporal, no es necesario para aplicar los procedimientos estadísticos a utilizar; ii) En sentido estricto desde lo estadístico el número mínimo de datos del indicador necesario para aplicar estos procedimientos es de 4 valores. No obstante, es conveniente que la serie a estudiar tenga más de 10 y menos de 50 datos; iii) La serie de datos puede tener varios registros de igual valor, se denominan “empates”. En tal caso se aplican correcciones a los cálculos de la varianza.

Procedimiento para el Análisis de Tendencia de Mann-Kendall

Paso 1: Obtener todas las diferencias entre el valor más reciente y el valor más antiguo del conjunto de datos. Si la diferencia es positiva se contabiliza un “1”, si es negativa un “-1” y si los datos son iguales se contabiliza un “0”. Tomando los datos del caso simple tenemos:

$$58,3 - 63,4 \Rightarrow -1; 60,1 - 63,4 \Rightarrow -1; 37,3 - 63,4 \Rightarrow -1; 37,3 - 63,4 \Rightarrow -1$$

$$60,1 - 58,3 \Rightarrow 1; 37,3 - 58,3 \Rightarrow -1; 37,3 - 58,3 \Rightarrow -1$$

$$37,3 - 60,1 \Rightarrow -1; 37,3 - 60,1 \Rightarrow -1$$

$$37,3 - 37,3 \Rightarrow 0$$

Paso 2: Obtener el estadístico **S** de Mann-Kendall, sumando algebraicamente todos los “1” y “-1” obtenidos. En este caso **S** = -7.

Paso 3: Obtener la Varianza de **S** (Var(**S**)) aplicando la siguiente expresión:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18}$$

Donde:

n = Número de Datos (5 en el caso simple);
 g = Número de grupos de datos “empatados” (1 en el caso simple);
 t_p = Número de datos que componen cada grupo (2 en el caso simple)
 Luego, $\text{Var}(S) = [(5 \times 4 \times 15) - (2 \times 1 \times 9)]/18 = (300 - 18)/18 = 15,67$

Paso 4: Una vez obtenido S y $\text{Var}(S)$, aplicando la corrección por empates si fuera necesario, calcular el valor de Z conforme a la expresión siguiente:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Luego, $Z = (-7 + 1)/(15,67)^{0,5} = -6/3,959 = -1,516$

Paso 5: Dado que Z sigue la Distribución Normal Estándar calcular la probabilidad bilateral (p) del valor de Z obtenido aplicando la siguiente expresión en una casilla de la planilla Excel:

$$p = 2 \times \text{DISTR.NORM.ESTAND}(-1,516) = 0,13$$

Paso 6: Con el valor de p estimado corresponde evaluar si la tendencia decreciente que indica el valor $S = -7$ es significativa. Como $p = 0,13$ es mayor que 0,05 resulta que la tendencia de los datos que se ha estimado para el caso simple NO es significativa.

Procedimiento para el cálculo de la Pendiente de Sen

Paso 1: Calcular todas las diferencias entre valor más reciente y valor más antiguo del conjunto de datos, dividiendo cada resta por el número de años que transcurrieron entre ambos datos, para obtener la pendiente asociada a cada par de datos. Tomando los datos del caso simple tenemos:

$(58,3 - 63,4)/2 = -2,55$; $(60,1 - 63,4)/3 = -1,10$; $(37,3 - 63,4)/7 = -3,73$; $(37,3 - 63,4)/9 = -2,90$
 $(60,1 - 58,3)/1 = 1,80$; $(37,3 - 58,3)/5 = -4,20$; $(37,3 - 58,3)/7 = -3,00$
 $(37,3 - 60,1)/4 = -5,70$; $(37,3 - 60,1)/6 = -3,80$
 $(37,3 - 37,3)/2 = 0,00$

Paso 2: La Pendiente de Sen es la MEDIANA de las pendientes obtenidas. Las pendientes ordenadas de menor a mayor son: -5,70; -4,20; -3,80; -3,73; -3,00; -2,90; -2,55; -1,10; 0,00; 1,80. La Mediana resulta del promedio entre la 5ta. Y la 6ta. Pendiente. Es decir, la Pendiente de Sen (**PS**) = -2,95 m3/seg/año.

Paso 3: Calcular los IC95%. $\text{Var}(\mathbf{PS}) = \text{Var}(\mathbf{S}) = 15,67$. La semi-amplitud del intervalo de confianza se estima como el entero más próximo al resultado de multiplicar $1,96 \times (\text{Var}(\mathbf{PS}))^{0,5} \Rightarrow 8$. El orden que corresponde al extremo inferior del IC95% para las 10 pendientes obtenidas se calcula como $(10 - 8)/2 = 1$, y el orden que corresponde al extremo superior del IC95 resulta de $(10 + 8)/2 = 9$. Luego el IC95% para **PS** es [-5,70 a 0,00].

Procedimiento para el cálculo del Tau de Kendall

Paso 1: El Tau de Kendall (**T_b**) se calcula a partir del **S** de Mann-Kendall conforme a la siguiente expresión: $\mathbf{T_b} = \mathbf{S}/(\mathbf{N} \times (\mathbf{N}-\mathbf{T}))^{0,5}$. Donde: **S** = -7 en el caso simple; **N** = Número de pares comparados, 10 en el caso simple; y **T** = Número de empates, 1 en el caso simple. Luego **T_b** = -0,74.

Paso 2: Para obtener el IC95% del **T_b** se ha de calcular en forma previa el error estándar (ES) del mismo mediante la siguiente expresión:
 $\text{ES} = [\text{Var}(\mathbf{S})/(\mathbf{N} \times (\mathbf{N}-\mathbf{T}))]^{0,5} = [15,67/90]^{0,5} = 0,42$

Paso 3: Finalmente IC95% del **T_b** es [**T_b** ± 1,96xES]. Para el caso simple el IC95% del **T_b** es [-1,00; 0,08]. Al calcular el IC95% del **T_b** tener en cuenta que el rango de valores del **T_b** oscila entre -1 y 1.

3. Casos Complejos. Aplicación de la IA

Se desplegarán a continuación tres casos complejos de análisis de tendencias utilizando “prompt” (o solicitudes) mediante los cuales se utilizará la IA para realizar los cálculos a partir de los datos que corresponden a cada ejemplo.

Dichos datos llegarán a la interacción con la aplicación de IA que se utilice, mediante una simple tabla en Excel, Hoja de Cálculo o Documento de Google o archivo de texto, tal como se muestra en la columna izquierda de la especificación de cada Caso.

Los prompt y los datos que se ingresan a la aplicación de IA, al facilitar los cálculos, permiten obtener en forma rápida los resultados de los análisis de tendencia y su interpretación, a fin de enfocar el trabajo del técnico en salud ambiental u otra especialidad en el diseño de programas y medidas orientadas a la mejora de la calidad del ambiente y/o del área de gestión que cubre sus competencias.

Nota: Los RESULTADOS reportados para los Casos #1, #2 y #3 (incluido el Anexo) (*textos en itálica en las páginas anteriores*), fueron generados por la aplicación de IA ChatGPT de OpenAI (www.openai.com) utilizando los prompt/solicitudes que se consignaron en las respectivas tablas de especificación de cada Caso. Y se incluyen en este Manual sin modificación alguna.

Caso #1 - Especificación

Datos	Prompt/Solicitud																																																																		
<table border="1"> <caption>Río Chubut - Caudal Promedio Anual (Datos Históricos)</caption> <thead> <tr> <th>Año</th><th>Caudal Medio Anual (m3/seg)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1993</td><td>53,7</td></tr> <tr><td>1994</td><td>50,7</td></tr> <tr><td>1995</td><td>42,8</td></tr> <tr><td>1996</td><td>43,2</td></tr> <tr><td>1997</td><td>31,3</td></tr> <tr><td>1998</td><td>36,8</td></tr> <tr><td>1999</td><td>32,9</td></tr> <tr><td>2000</td><td>34,2</td></tr> <tr><td>2001</td><td>63,4</td></tr> <tr><td>2002</td><td>62,3</td></tr> <tr><td>2003</td><td>58,3</td></tr> <tr><td>2004</td><td>60,1</td></tr> <tr><td>2005</td><td>50,3</td></tr> <tr><td>2006</td><td>74,2</td></tr> <tr><td>2007</td><td>48,5</td></tr> <tr><td>2008</td><td>37,3</td></tr> <tr><td>2009</td><td>42,0</td></tr> <tr><td>2010</td><td>46,1</td></tr> <tr><td>2011</td><td>31,5</td></tr> <tr><td>2012</td><td>31,4</td></tr> <tr><td>2013</td><td>34,4</td></tr> <tr><td>2014</td><td>40,0</td></tr> <tr><td>2015</td><td>53,2</td></tr> <tr><td>2016</td><td>39,3</td></tr> <tr><td>2017</td><td>53,3</td></tr> <tr><td>2018</td><td>34,1</td></tr> <tr><td>2019</td><td>32,3</td></tr> <tr><td>2020</td><td>36,0</td></tr> <tr><td>2021</td><td>30,5</td></tr> <tr><td>2022</td><td>35,9</td></tr> <tr><td>2023</td><td>33,0</td></tr> <tr><td>2024</td><td>32,3</td></tr> </tbody> </table>	Año	Caudal Medio Anual (m3/seg)	1993	53,7	1994	50,7	1995	42,8	1996	43,2	1997	31,3	1998	36,8	1999	32,9	2000	34,2	2001	63,4	2002	62,3	2003	58,3	2004	60,1	2005	50,3	2006	74,2	2007	48,5	2008	37,3	2009	42,0	2010	46,1	2011	31,5	2012	31,4	2013	34,4	2014	40,0	2015	53,2	2016	39,3	2017	53,3	2018	34,1	2019	32,3	2020	36,0	2021	30,5	2022	35,9	2023	33,0	2024	32,3	Actúa como un experto en bioestadística y gestión ambiental. Te adjunto un archivo que contiene una tabla con datos de monitoreo temporal del indicador: <i>caudal (promedio anual) del Río Chubut, Argentina</i>. En relación con el conjunto de datos aportados, por favor, realiza las siguientes tareas ejecutando el pertinente código Python de forma interna para garantizar precisión matemática en los cálculos, es decir, no aproximes textualmente tu respuesta. Sin embargo, en las tablas de reporte de resultados y textos de informes consignar las cifras con aproximaciones de hasta 3 decimales: - Devuelve una tabla con bordes con los datos tomados del archivo adjunto. - Realiza el Test de Tendencia de Mann-Kendall. Devuelve el valor del estadístico S, la varianza de S, el valor Z estandarizado y el p-valor. Señala si hay “empates” en la serie de datos. Aplicar las correcciones correspondientes a la varianza en caso de datos empatados. Luego indica si la tendencia de la serie temporal es estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$). Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Test. - Calcula la Pendiente de Sen junto con su Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro de la Pendiente y el IC95%. - Calcula el Tau de Kendall y su correspondiente Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Tau de Kendall. - Verifica mediante el método del Rango Intercuartílico (IQR) si existen valores atípicos en la serie. Por favor consignar los resultados en una tabla que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del método IQR. - Genera un gráfico que pueda descargar que muestre la evolución de la serie temporal del indicador: <i>caudales del Río Chubut</i>, así como la pendiente de Sen correspondiente. - Genera un reporte que contenga los resultados numéricos de los cálculos realizados y su interpretación en el marco del conjunto de datos analizados. - Genera un breve informe de unas 500 palabras redactado para ser interpretado por un técnico de gestión <i>ambiental</i> municipal o provincial, explicando qué significan los resultados obtenidos para la toma de decisiones con relación a las políticas públicas a aplicar en la jurisdicción en el contexto de sus competencias.
Año	Caudal Medio Anual (m3/seg)																																																																		
1993	53,7																																																																		
1994	50,7																																																																		
1995	42,8																																																																		
1996	43,2																																																																		
1997	31,3																																																																		
1998	36,8																																																																		
1999	32,9																																																																		
2000	34,2																																																																		
2001	63,4																																																																		
2002	62,3																																																																		
2003	58,3																																																																		
2004	60,1																																																																		
2005	50,3																																																																		
2006	74,2																																																																		
2007	48,5																																																																		
2008	37,3																																																																		
2009	42,0																																																																		
2010	46,1																																																																		
2011	31,5																																																																		
2012	31,4																																																																		
2013	34,4																																																																		
2014	40,0																																																																		
2015	53,2																																																																		
2016	39,3																																																																		
2017	53,3																																																																		
2018	34,1																																																																		
2019	32,3																																																																		
2020	36,0																																																																		
2021	30,5																																																																		
2022	35,9																																																																		
2023	33,0																																																																		
2024	32,3																																																																		

Caso #1 – RESULTADOS

Análisis de tendencia temporal del caudal medio anual del Río Chubut (1993–2024)

Mann-Kendall, Pendiente de Sen, Tau de Kendall e IQR

Criterio de presentación: los cálculos fueron realizados internamente con precisión completa en Python. Para facilitar la lectura técnica y la interpretación ambiental, los resultados se reportan con aproximaciones de hasta 3 decimales.

1. Datos tomados del archivo adjunto

<i>Año</i>	<i>Caudal medio anual (m³/s)</i>
1993	53,7
1994	50,7
1995	42,8
1996	43,2
1997	31,3
1998	36,8
1999	32,9
2000	34,2
2001	63,4
2002	62,3
2003	58,3
2004	60,1
2005	50,3
2006	74,2
2007	48,5
2008	37,3
2009	42,0
2010	46,1
2011	31,5
2012	31,4
2013	34,4
2014	40,0
2015	53,2
2016	39,3
2017	53,3
2018	34,1
2019	32,3
2020	36,0
2021	30,5
2022	35,9
2023	33,0
2024	32,3

2. Test de tendencia de Mann-Kendall

Parámetro	Resultado
<i>n</i>	32
Número total de pares, <i>N</i>	496
Pares concordantes	171
Pares discordantes	324
Pares empatados en caudal	1
Empates en la serie	Sí: 32,3 m ³ /s aparece 2 veces (2019, 2024)
Estadístico <i>S</i>	-153
Var(<i>S</i>), corregida por empates	3801,667
<i>Z</i> estandarizado	-2,465
<i>p</i> -valor bilateral	0,013
Significativo con alfa = 0,05	Sí
Sentido de la tendencia	Descendente

Interpretación: el resultado del test de Mann-Kendall indica una tendencia descendente estadísticamente significativa del caudal medio anual en el período analizado (alfa = 0,05).

3. Pendiente de Sen e IC95%

Parámetro	Resultado
Número de pendientes pareadas	496
Pendiente de Sen	-0,500 m ³ /s/año
Pendiente de Sen por década	-4,998 m ³ /s/década
IC95% inferior	-0,958 m ³ /s/año
IC95% superior	-0,100 m ³ /s/año
Empates	Sí
Tratamiento aplicado	Se incluyeron pendientes nulas; Var(<i>S</i>) corregida por empates para el IC95%

Interpretación: la pendiente de Sen estima una disminución de aproximadamente -0,500 m³/s por año, equivalente a -4,998 m³/s por década. El IC95% [-0,958; -0,100] queda completamente por debajo de cero.

4. Tau de Kendall e IC95%

Parámetro	Resultado
Tau-a	-0,308
Tau-b, corregido por empates	-0,309
Error estándar de Tau-b	0,124
IC95% inferior	-0,553
IC95% superior	-0,065
Empates considerados	1

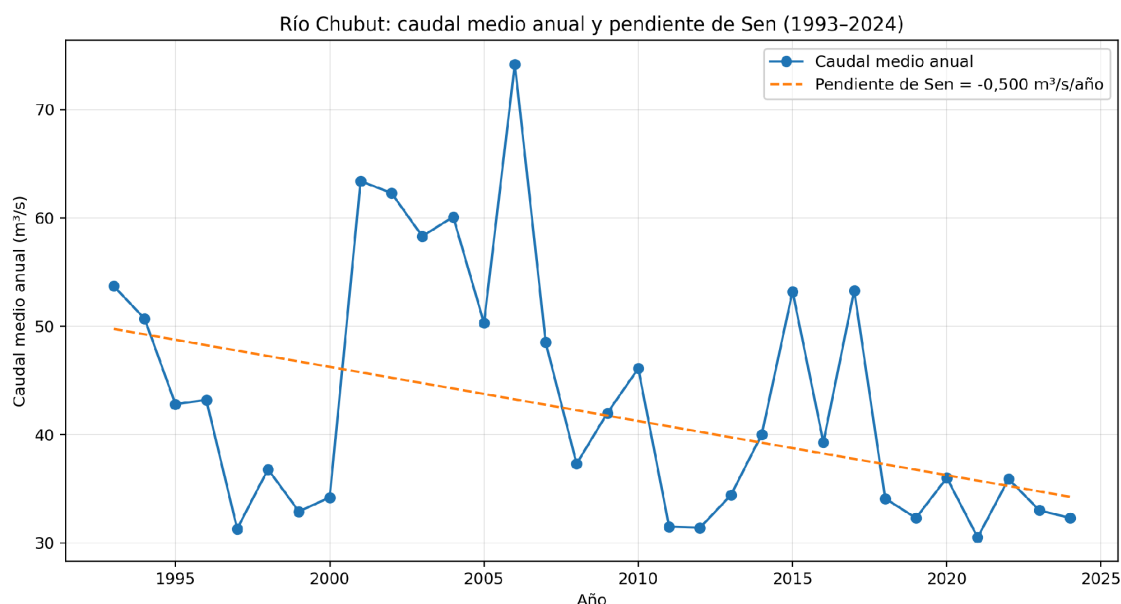
Interpretación: Tau-b negativo confirma una asociación monotónica inversa entre año y caudal: los años más recientes tienden a presentar caudales menores.

5. Método IQR para detección de valores atípicos

Parámetro	Resultado
Q1	33,825 m ³ /s
Mediana	39,650 m ³ /s
Q3	51,325 m ³ /s
IQR	17,500 m ³ /s
Límite inferior	7,575 m ³ /s
Límite superior	77,575 m ³ /s
Valor mínimo observado	30,500 m ³ /s
Valor máximo observado	74,200 m ³ /s
Valores atípicos detectados	0

Interpretación: no se detectaron valores atípicos por IQR, por lo que la tendencia no parece depender de un único año extremo.

6. Gráfico de evolución temporal y pendiente de Sen



7. Reporte interpretativo de resultados

La serie de caudales medios anuales del Río Chubut para el período 1993–2024 fue evaluada mediante métodos no paramétricos, adecuados para

datos ambientales porque no requieren asumir normalidad. El test de Mann-Kendall arrojó un S negativo, con $Z = -2,465$ y $p = 0,013$. Dado que el p -valor es inferior a $0,05$, se rechaza la hipótesis nula de ausencia de tendencia y se concluye que existe una tendencia descendente estadísticamente significativa.

La Pendiente de Sen fue $-0,500 \text{ m}^3/\text{s/año}$, con IC95% entre $-0,958$ y $-0,100 \text{ m}^3/\text{s/año}$. En términos de gestión, esto equivale a una reducción aproximada de $4,998 \text{ m}^3/\text{s}$ por década. El Tau-b de Kendall fue $-0,309$, con IC95% entre $-0,553$ y $-0,065$, consistente con una relación inversa entre el avance del tiempo y los caudales observados.

El análisis IQR no identificó valores atípicos. Por lo tanto, la señal descendente no parece estar determinada por un año excepcionalmente seco o húmedo, sino por el patrón global de la serie. Esta información debería interpretarse como una alerta cuantitativa para la planificación hídrica y ambiental.

8. Informe breve para gestión ambiental municipal/provincial

El análisis de la serie de caudales medios anuales del Río Chubut para el período 1993–2024 muestra una disminución estadísticamente significativa. El test de Mann-Kendall, que permite evaluar tendencias temporales sin exigir que los datos sigan una distribución normal, arrojó un resultado compatible con una tendencia descendente. En términos simples, los datos indican que, con el paso de los años, los caudales medios anuales tienden a ser menores. Este resultado no debe interpretarse como una prueba automática de una causa única, pero sí como una señal suficientemente consistente como para ser incorporada a la gestión pública del recurso hídrico.

La Pendiente de Sen estimó una reducción aproximada de $0,500 \text{ m}^3/\text{s}$ por año, equivalente a $4,998 \text{ m}^3/\text{s}$ por década. Además, el intervalo de confianza del 95% se ubicó entre $-0,958$ y $-0,100 \text{ m}^3/\text{s}$ por año, completamente por debajo de cero. Esto refuerza la interpretación de una disminución real y no meramente circunstancial. El Tau de Kendall también fue negativo, confirmando una asociación inversa entre el año de observación y el caudal medio anual.

Desde la perspectiva de un organismo municipal o provincial, estos resultados tienen implicancias relevantes. La disminución del caudal puede afectar la disponibilidad de agua para abastecimiento urbano, riego, producción, conservación de ecosistemas acuáticos, dilución de efluentes y planificación territorial. Por ello, la información debería incorporarse a los balances hídricos, a la evaluación de permisos de uso, a los planes de contingencia frente a sequías y a los sistemas de alerta temprana.

El método IQR no detectó valores atípicos, lo cual sugiere que la tendencia no depende de un año aislado, sino del comportamiento general de la serie. Esto fortalece su utilidad como insumo técnico. La recomendación de política pública es avanzar hacia una gestión preventiva: mejorar la medición hidrométrica, reducir pérdidas, promover eficiencia en el uso agrícola y urbano, revisar escenarios de disponibilidad futura y comunicar el riesgo de manera clara. La estadística no reemplaza el análisis hidrológico integral, pero aporta una base objetiva para tomar decisiones anticipatorias.

Para la toma de decisiones, la señal estadística justifica aplicar un enfoque precautorio y adaptativo. Esto implica no esperar a que se manifiesten crisis de suministro para actuar, sino fortalecer la eficiencia, priorizar usos esenciales, evaluar caudales ecológicos, actualizar permisos y mejorar la transparencia de la información pública. La tendencia no determina por sí sola una política específica, pero sí ofrece una base objetiva para ordenar prioridades y orientar medidas de mediano plazo.

En términos institucionales, el resultado debería traducirse en rutinas de seguimiento y no solamente en una constatación estadística. Conviene definir indicadores de alerta, revisar anualmente la serie, contrastarla con precipitaciones, nieve acumulada, temperaturas, extracciones y operación de obras hidráulicas. También resulta recomendable articular a los organismos hídricos con áreas de ambiente, producción, salud, defensa civil y municipios ribereños, porque una disminución sostenida del caudal puede impactar simultáneamente en abastecimiento, calidad del agua, conflictos de uso y vulnerabilidad frente a sequías.

Caso #2 – Especificación

Datos	Prompt/Solicitud																																		
<table border="1"> <caption>Concentración media anual de PM_{2,5} en España</caption> <thead> <tr> <th>Año</th><th>PM_{2,5} Media Anual</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>2009</td><td>15,1</td></tr> <tr><td>2010</td><td>13,4</td></tr> <tr><td>2011</td><td>13,8</td></tr> <tr><td>2012</td><td>13,7</td></tr> <tr><td>2013</td><td>11,5</td></tr> <tr><td>2014</td><td>11,7</td></tr> <tr><td>2015</td><td>14,0</td></tr> <tr><td>2016</td><td>11,5</td></tr> <tr><td>2017</td><td>12,7</td></tr> <tr><td>2018</td><td>11,5</td></tr> <tr><td>2019</td><td>11,5</td></tr> <tr><td>2020</td><td>11,0</td></tr> <tr><td>2021</td><td>10,3</td></tr> <tr><td>2022</td><td>12,0</td></tr> <tr><td>2023</td><td>11,0</td></tr> <tr><td>2024</td><td>11,4</td></tr> </tbody> </table>	Año	PM _{2,5} Media Anual	2009	15,1	2010	13,4	2011	13,8	2012	13,7	2013	11,5	2014	11,7	2015	14,0	2016	11,5	2017	12,7	2018	11,5	2019	11,5	2020	11,0	2021	10,3	2022	12,0	2023	11,0	2024	11,4	Actúa como un experto en bioestadística y gestión ambiental. Te adjunto un archivo que contiene una tabla con datos de monitoreo temporal del indicador: <i>Concentración media anual en aire de PM_{2,5} en España</i>. En relación con el conjunto de datos aportados, por favor, realiza las siguientes tareas ejecutando el pertinente código Python de forma interna para garantizar precisión matemática en los cálculos, es decir, no aproximes textualmente tu respuesta. Sin embargo, en las tablas de reporte de resultados y textos de informes consignar las cifras con aproximaciones de hasta 3 decimales: - Devuelve una tabla con bordes con los datos tomados del archivo adjunto. - Realiza el Test de Tendencia de Mann-Kendall. Devuelve el valor del estadístico S, la varianza de S, el valor Z estandarizado y el p-valor. Señala si hay “empates” en la serie de datos. Aplicar las correcciones correspondientes a la varianza en caso de datos empatados. Luego indica si la tendencia de la serie temporal es estadísticamente significativa (alfa = 0.05). Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Test. - Calcula la Pendiente de Sen junto con su Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro de la Pendiente y el IC95%. - Calcula el Tau de Kendall y su correspondiente Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Tau de Kendall. - Verifica mediante el método del Rango Intercuartílico (IQR) si existen valores atípicos en la serie. Por favor consignar los resultados en una tabla que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del método IQR. - Genera un gráfico que pueda descargar que muestre la evolución de la serie temporal del indicador: <i>concentración media anual en aire de PM_{2,5} en España</i>, así como la pendiente de Sen correspondiente. - Genera un reporte que contenga los resultados numéricos de los cálculos realizados y su interpretación en el marco del conjunto de datos analizados - Genera un breve informe de unas 500 palabras redactado para ser interpretado por un técnico de gestión <i>ambiental</i> municipal o provincial, explicando qué significan los resultados obtenidos para la toma de decisiones con relación a las políticas públicas a aplicar en la jurisdicción en el contexto de sus competencias.
Año	PM _{2,5} Media Anual																																		
2009	15,1																																		
2010	13,4																																		
2011	13,8																																		
2012	13,7																																		
2013	11,5																																		
2014	11,7																																		
2015	14,0																																		
2016	11,5																																		
2017	12,7																																		
2018	11,5																																		
2019	11,5																																		
2020	11,0																																		
2021	10,3																																		
2022	12,0																																		
2023	11,0																																		
2024	11,4																																		

Caso #2 – RESULTADOS

Análisis de tendencia temporal: PM_{2,5} media anual en España (2009–2024)

Test de Mann-Kendall, Pendiente de Sen, Tau de Kendall e IQR

1. Datos tomados del archivo adjunto

La tabla siguiente reproduce los datos de concentración media anual de PM_{2,5} utilizados para el análisis.

Año	PM_{2,5} media anual (µg/m³)
2009	15,1
2010	13,4
2011	13,8
2012	13,7
2013	11,5
2014	11,7
2015	14,0
2016	11,5
2017	12,7
2018	11,5
2019	11,5
2020	11,0
2021	10,3
2022	12,0
2023	11,0
2024	11,4

2. Test de tendencia de Mann-Kendall

Se aplicó el test de Mann-Kendall con corrección de varianza por empates en la serie de concentración.

Parámetro	Resultado
<i>n</i>	16
<i>Número total de pares</i>	120
<i>Pares concordantes</i>	22
<i>Pares discordantes</i>	91
<i>Pares empatados en PM_{2,5}</i>	7
<i>Empates en la serie</i>	Sí: 11,0 µg/m ³ aparece 2 veces; 11,5 µg/m ³ aparece 4 veces
<i>Estadístico S</i>	-69
<i>Var(S), corregida por empates</i>	483,667
<i>Z estandarizado</i>	-3,092
<i>p-valor bilateral</i>	0,001
<i>Significativo con alfa = 0,05</i>	Sí
<i>Sentido de la tendencia</i>	Descendente

Interpretación: el estadístico S negativo y el p-valor bilateral menor que 0,05 indican una tendencia descendente estadísticamente significativa.

3. Pendiente de Sen e IC95%

Parámetro	Resultado
Número de pendientes pareadas	120
Pendiente de Sen	-0,200 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$
Pendiente de Sen por década	-2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{década}$
IC95% inferior	-0,329 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$
IC95% superior	-0,071 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$
Empates	Si
Tratamiento aplicado	Pendientes nulas incluidas; Var(S) corregida por empates para el IC95%

Interpretación: la pendiente estimada indica una disminución de aproximadamente 0,200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por año. El IC95% se ubica completamente por debajo de cero, lo que refuerza la evidencia de reducción temporal.

4. Tau de Kendall e IC95%

Parámetro	Resultado
Tau-a	-0,575
Tau-b, corregido por empates	-0,593
Error estándar de Tau-b	0,189
IC95% inferior	-0,963
IC95% superior	-0,222
Empates considerados	7 pares empatados

Interpretación: Tau-b negativo confirma una asociación monotónica inversa entre el año y la concentración de PM_{2,5}.

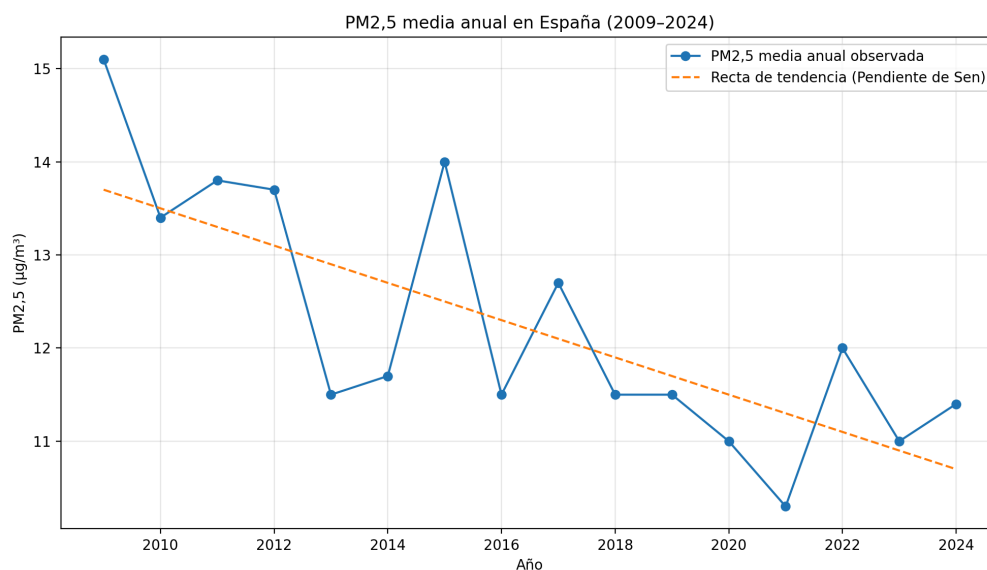
5. Verificación de valores atípicos por IQR

Parámetro	Resultado
Q1	11,475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mediana	11,600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Q3	13,475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
IQR	2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Límite inferior	8,475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Límite superior	16,475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valor mínimo observado	10,300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valor máximo observado	15,100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Valores atípicos detectados	0

Interpretación: no se detectaron valores atípicos por el método IQR. Por lo tanto, la tendencia descendente no parece estar explicada por uno o dos años anómalos.

6. Gráfico de evolución temporal y Pendiente de Sen

El gráfico muestra la evolución anual de PM_{2,5} y la recta de tendencia robusta asociada a la Pendiente de Sen.



7. Reporte interpretativo

El análisis de la serie 2009–2024 muestra una reducción estadísticamente significativa de la concentración media anual de PM_{2,5} en España. El test de Mann-Kendall identificó una tendencia descendente con $p = 0,001$. Debido a la presencia de empates en los valores de concentración, se aplicaron las correcciones correspondientes en la varianza de S y se reportó Tau-b.

La Pendiente de Sen fue de $-0,200 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$, equivalente a $-2,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por década. El IC95% de la pendiente se extendió de $-0,329$ a $-0,071 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$, completamente por debajo de cero. Esto indica que la reducción no solo es estadísticamente significativa, sino también consistente bajo una estimación robusta.

La ausencia de valores atípicos por IQR aporta confianza adicional: la señal descendente observada responde al patrón general de la serie y no a un valor extremo aislado. Desde el punto de vista de salud pública, la reducción de PM_{2,5} es relevante, dado que este contaminante está asociado a impactos respiratorios y cardiovasculares. No obstante, la mejora no debe interpretarse como motivo para relajar las políticas de control, sino como evidencia de que conviene sostener y profundizar las acciones de gestión.

8. Informe para técnico de gestión ambiental municipal/provincial

El análisis de la concentración media anual de PM_{2,5} en España para el período 2009–2024 muestra una tendencia descendente estadísticamente significativa. El test de Mann-Kendall, adecuado para evaluar tendencias ambientales sin exigir normalidad de los datos, arrojó un estadístico S negativo y un p -valor de $0,001$. Esto permite rechazar la hipótesis de ausencia de tendencia al nivel de significación del 5%. En términos operativos, los datos indican que las concentraciones medias anuales de PM_{2,5} tienden a disminuir con el paso del tiempo.

La Pendiente de Sen estimó una reducción de $0,200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año, equivalente a $2,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por década. Su intervalo de confianza del 95% se ubicó entre $-0,329$ y $-0,071 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$, completamente por debajo de cero. Esto refuerza la conclusión de

que la disminución observada es consistente y no depende de una forma particular de modelar la serie. El Tau-b de Kendall también fue negativo, lo que confirma una asociación inversa entre año y concentración. Además, el análisis por Rango Intercuartílico no detectó valores atípicos, por lo que el resultado no parece estar dominado por uno o dos años excepcionales.

Para la gestión ambiental municipal o provincial, estos resultados son una señal favorable, pero no deben interpretarse como que el problema está resuelto. El PM_{2,5} es un contaminante prioritario por sus efectos sobre la salud respiratoria y cardiovascular, especialmente en niños, adultos mayores y personas con enfermedades previas. La tendencia descendente sugiere que las políticas de reducción de emisiones, control de fuentes y mejora tecnológica pueden estar contribuyendo a una mejor calidad del aire, aunque el análisis estadístico no permite atribuir causalidad por sí solo.

Desde la perspectiva de las políticas públicas, conviene sostener y fortalecer el monitoreo, mejorar los inventarios de emisiones, priorizar intervenciones sobre transporte, calefacción residencial, actividad industrial y quemas, y mantener sistemas de alerta para episodios de contaminación. También resulta recomendable integrar estos resultados con información sanitaria, meteorológica y territorial, para identificar zonas y poblaciones más vulnerables. En síntesis, la tendencia es positiva desde el punto de vista sanitario, pero la gestión debe aprovechar esta evidencia para consolidar políticas preventivas, reducir exposiciones y avanzar hacia metas de calidad del aire más protectoras.

Caso #3 – Especificación

Datos	Prompt/Solicitud																																																																										
Madrid - Concentraciones Medias Mensuales de PM2.5 (ug/m3) <table> <tr> <th>Mes Año</th><th>Est. CASTELLANA</th></tr> <tr><td>ENERO_2023</td><td>8,6</td></tr> <tr><td>FEBRERO_2023</td><td>10,2</td></tr> <tr><td>MARZO_2023</td><td>7,0</td></tr> <tr><td>ABRIL_2023</td><td>6,5</td></tr> <tr><td>MAYO_2023</td><td>8,6</td></tr> <tr><td>JUNIO_2023</td><td>9,9</td></tr> <tr><td>JULIO_2023</td><td>11,0</td></tr> <tr><td>AGOSTO_2023</td><td>8,6</td></tr> <tr><td>SEPTIEMBRE_2023</td><td>16,3</td></tr> <tr><td>OCTUBRE_2023</td><td>12,7</td></tr> <tr><td>NOVIEMBRE_2023</td><td>10,1</td></tr> <tr><td>DICIEMBRE_2023</td><td>13,4</td></tr> <tr><td>ENERO_2024</td><td>11,6</td></tr> <tr><td>FEBRERO_2024</td><td>8,2</td></tr> <tr><td>MARZO_2024</td><td>8,0</td></tr> <tr><td>ABRIL_2024</td><td>6,8</td></tr> <tr><td>MAYO_2024</td><td>5,3</td></tr> <tr><td>JUNIO_2024</td><td>7,8</td></tr> <tr><td>JULIO_2024</td><td>9,6</td></tr> <tr><td>AGOSTO_2024</td><td>11,1</td></tr> <tr><td>SEPTIEMBRE_2024</td><td>8,1</td></tr> <tr><td>OCTUBRE_2024</td><td>9,8</td></tr> <tr><td>NOVIEMBRE_2024</td><td>12,5</td></tr> <tr><td>DICIEMBRE_2024</td><td></td></tr> <tr><td>ENERO_2025</td><td>8,5</td></tr> <tr><td>FEBRERO_2025</td><td>10,1</td></tr> <tr><td>MARZO_2025</td><td>4,3</td></tr> <tr><td>ABRIL_2025</td><td>5,1</td></tr> <tr><td>MAYO_2025</td><td>5,5</td></tr> <tr><td>JUNIO_2025</td><td>8,3</td></tr> <tr><td>JULIO_2025</td><td>8,8</td></tr> <tr><td>AGOSTO_2025</td><td>17,6</td></tr> <tr><td>SEPTIEMBRE_2025</td><td>8,0</td></tr> <tr><td>OCTUBRE_2025</td><td>7,9</td></tr> <tr><td>NOVIEMBRE_2025</td><td>8,0</td></tr> <tr><td>DICIEMBRE_2025</td><td>8,6</td></tr> </table>	Mes Año	Est. CASTELLANA	ENERO_2023	8,6	FEBRERO_2023	10,2	MARZO_2023	7,0	ABRIL_2023	6,5	MAYO_2023	8,6	JUNIO_2023	9,9	JULIO_2023	11,0	AGOSTO_2023	8,6	SEPTIEMBRE_2023	16,3	OCTUBRE_2023	12,7	NOVIEMBRE_2023	10,1	DICIEMBRE_2023	13,4	ENERO_2024	11,6	FEBRERO_2024	8,2	MARZO_2024	8,0	ABRIL_2024	6,8	MAYO_2024	5,3	JUNIO_2024	7,8	JULIO_2024	9,6	AGOSTO_2024	11,1	SEPTIEMBRE_2024	8,1	OCTUBRE_2024	9,8	NOVIEMBRE_2024	12,5	DICIEMBRE_2024		ENERO_2025	8,5	FEBRERO_2025	10,1	MARZO_2025	4,3	ABRIL_2025	5,1	MAYO_2025	5,5	JUNIO_2025	8,3	JULIO_2025	8,8	AGOSTO_2025	17,6	SEPTIEMBRE_2025	8,0	OCTUBRE_2025	7,9	NOVIEMBRE_2025	8,0	DICIEMBRE_2025	8,6	Actúa como un experto en bioestadística y gestión ambiental. Te adjunto un archivo que contiene una tabla con datos de monitoreo temporal del indicador: Concentración en Aire de PM2.5 (promedio mensual entre Ene2023 y Dic2025) en la estación de monitoreo de calidad de aire ubicada en la Avenida de la Castellana de la ciudad de Madrid, España. En relación con el conjunto de datos aportados, por favor, realiza las siguientes tareas ejecutando el pertinente código Python de forma interna para garantizar precisión matemática en los cálculos, es decir, no aproximes textualmente tu respuesta. Sin embargo, en las tablas de reporte de resultados y textos de informes consignar las cifras con aproximaciones de hasta 3 decimales: - Devuelve una tabla con bordes con los datos tomados del archivo adjunto. - Realiza el Test de Tendencia de Mann-Kendall. Devuelve el valor del estadístico S, la varianza de S, el valor Z estandarizado y el p-valor. Señala si hay “empates” en la serie de datos. Aplicar las correcciones correspondientes a la varianza en caso de datos empatados. Luego indica si la tendencia de la serie temporal es estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$). Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Test. - Calcula la Pendiente de Sen junto con su Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro de la Pendiente y el IC95%. - Calcula el Tau de Kendall y su correspondiente Intervalo de Confianza del 95% (IC95%). Aplicar las correcciones correspondientes a la pendiente en caso de datos empatados. Por favor consignar los resultados en una tabla con bordes que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del Tau de Kendall. - Verifica mediante el método del Rango Intercuartílico (IQR) si existen valores atípicos en la serie. Por favor consignar los resultados en una tabla que permita identificar con claridad los valores que corresponden a cada parámetro del método IQR. - Genera un gráfico que pueda descargar que muestre la evolución de la serie temporal del indicador: Concentración Media Mensual de PM2.5, así como la pendiente de Sen correspondiente. - Genera un reporte que contenga los resultados numéricos de los cálculos realizados y su interpretación en el marco del conjunto de datos analizados. - Genera un breve informe de unas 500 palabras redactado para ser interpretado por un técnico de gestión ambiental municipal o provincial, explicando qué significan los
Mes Año	Est. CASTELLANA																																																																										
ENERO_2023	8,6																																																																										
FEBRERO_2023	10,2																																																																										
MARZO_2023	7,0																																																																										
ABRIL_2023	6,5																																																																										
MAYO_2023	8,6																																																																										
JUNIO_2023	9,9																																																																										
JULIO_2023	11,0																																																																										
AGOSTO_2023	8,6																																																																										
SEPTIEMBRE_2023	16,3																																																																										
OCTUBRE_2023	12,7																																																																										
NOVIEMBRE_2023	10,1																																																																										
DICIEMBRE_2023	13,4																																																																										
ENERO_2024	11,6																																																																										
FEBRERO_2024	8,2																																																																										
MARZO_2024	8,0																																																																										
ABRIL_2024	6,8																																																																										
MAYO_2024	5,3																																																																										
JUNIO_2024	7,8																																																																										
JULIO_2024	9,6																																																																										
AGOSTO_2024	11,1																																																																										
SEPTIEMBRE_2024	8,1																																																																										
OCTUBRE_2024	9,8																																																																										
NOVIEMBRE_2024	12,5																																																																										
DICIEMBRE_2024																																																																											
ENERO_2025	8,5																																																																										
FEBRERO_2025	10,1																																																																										
MARZO_2025	4,3																																																																										
ABRIL_2025	5,1																																																																										
MAYO_2025	5,5																																																																										
JUNIO_2025	8,3																																																																										
JULIO_2025	8,8																																																																										
AGOSTO_2025	17,6																																																																										
SEPTIEMBRE_2025	8,0																																																																										
OCTUBRE_2025	7,9																																																																										
NOVIEMBRE_2025	8,0																																																																										
DICIEMBRE_2025	8,6																																																																										

	resultados obtenidos para la toma de decisiones con relación a las políticas públicas a aplicar en la jurisdicción en el contexto de sus competencias.
--	--

Caso #3 – RESULTADOS

Reporte de análisis de tendencia - PM_{2,5} mensual Estación Castellana, Madrid (Ene-2023 a Dic-2025)

Indicador analizado: concentración media mensual de PM_{2,5} en aire ambiente (µg/m³). El archivo contiene 36 meses calendario, con un dato faltante en DICIEMBRE_2024; los análisis estadísticos se realizaron con 35 observaciones válidas.

1. Datos tomados del archivo adjunto

Nº	Mes Año	PM _{2,5} media mensual (µg/m ³)
1	ENERO_2023	8,600
2	FEBRERO_2023	10,200
3	MARZO_2023	7,000
4	ABRIL_2023	6,500
5	MAYO_2023	8,600
6	JUNIO_2023	9,900
7	JULIO_2023	11,000
8	AGOSTO_2023	8,600
9	SEPTIEMBRE_2023	16,300
10	OCTUBRE_2023	12,700
11	NOVIEMBRE_2023	10,100
12	DICIEMBRE_2023	13,400
13	ENERO_2024	11,600
14	FEBRERO_2024	8,200
15	MARZO_2024	8,000
16	ABRIL_2024	6,800
17	MAYO_2024	5,300
18	JUNIO_2024	7,800
19	JULIO_2024	9,600
20	AGOSTO_2024	11,100
21	SEPTIEMBRE_2024	8,100
22	OCTUBRE_2024	9,800
23	NOVIEMBRE_2024	12,500
24	DICIEMBRE_2024	Sin dato
25	ENERO_2025	8,500
26	FEBRERO_2025	10,100
27	MARZO_2025	4,300
28	ABRIL_2025	5,100
29	MAYO_2025	5,500
30	JUNIO_2025	8,300
31	JULIO_2025	8,800
32	AGOSTO_2025	17,600
33	SEPTIEMBRE_2025	8,000
34	OCTUBRE_2025	7,900
35	NOVIEMBRE_2025	8,000
36	DICIEMBRE_2025	8,600

2. Test de tendencia de Mann-Kendall

Parámetro	Resultado
Observaciones válidas	35
Estadístico S	-81
Varianza de S corregida por empates	4945,000
Z estandarizado	-1,138
p-valor bilateral	0,255
Empates en la serie	Sí
Valores empatados	8,000, 8,600, 10,100
Alfa	0,050
Tendencia estadísticamente significativa	No

Interpretación: el signo negativo de S sugiere una orientación descendente, pero el p-valor es mayor que 0,05. No hay evidencia estadística suficiente para afirmar que exista una tendencia monotónica significativa en las concentraciones mensuales de PM_{2,5} durante 2023-2025.

3. Pendiente de Sen e IC95%

Parámetro	Resultado
Número de pendientes pareadas	595
Pendiente de Sen	-0,035 µg/m ³ /mes
IC95% inferior	-0,115 µg/m ³ /mes
IC95% superior	0,040 µg/m ³ /mes
Pendiente anualizada	-0,424 µg/m ³ /año
IC95% anualizado inferior	-1,378 µg/m ³ /año
IC95% anualizado superior	0,480 µg/m ³ /año

Interpretación: la Pendiente de Sen indica una disminución central estimada de 0,035 µg/m³ por mes, equivalente a 0,424 µg/m³ por año. Sin embargo, el IC95% incluye el valor cero, por lo que el resultado es compatible tanto con una reducción débil como con ausencia de cambio neto estadísticamente demostrable.

4. Tau de Kendall e IC95%

Parámetro	Resultado
Tau-b de Kendall	-0,137
Error estándar aproximado	0,119
IC95% inferior	-0,371
IC95% superior	0,096
Interpretación	Asociación temporal negativa débil y no significativa

5. Detección de valores atípicos mediante IQR

Parámetro IQR	Resultado
Q1	7,950
Mediana	8,600
Q3	10,150
IQR	2,200
Límite inferior	4,650
Límite superior	13,450
Valores atípicos detectados	Sí

Mes Año	Valor atípico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tipo
SEPTIEMBRE 2023	16,300	Alto
MARZO 2025	4,300	Bajo
AGOSTO 2025	17,600	Alto

6. Gráfico de evolución temporal y Pendiente de Sen

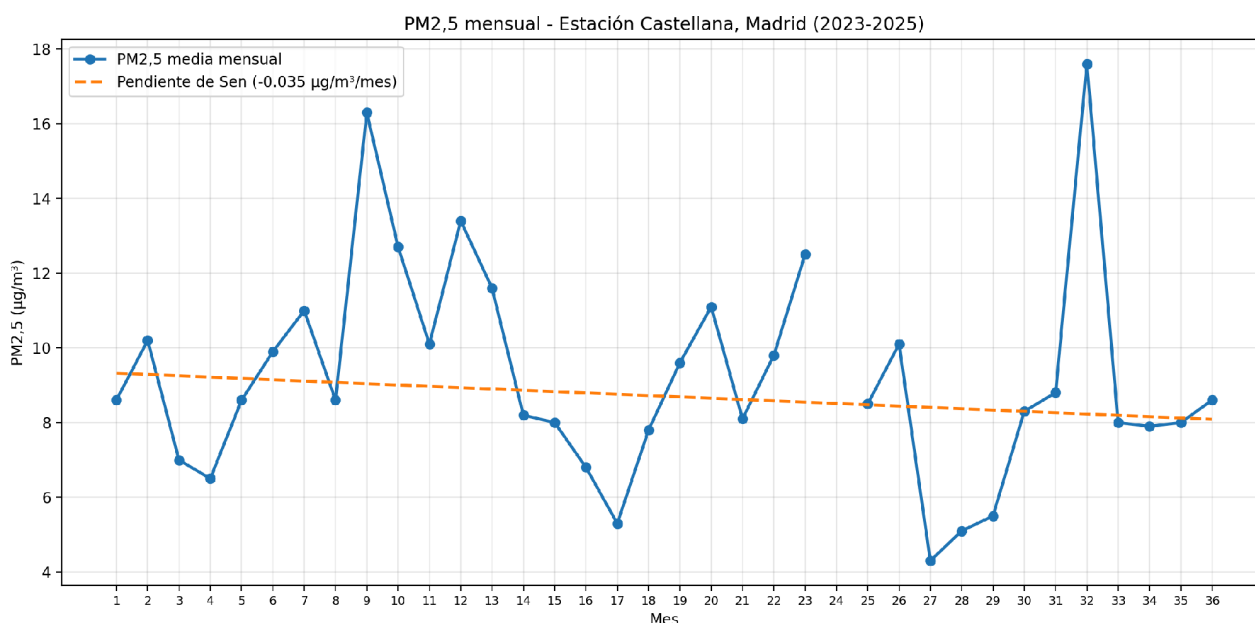


Figura 1. Serie mensual de PM2,5 en estación Castellana y recta correspondiente a la Pendiente de Sen.

7. Reporte técnico de resultados e interpretación

La serie analizada corresponde a concentraciones medias mensuales de PM2,5 medidas en la estación Castellana, Madrid, entre enero de 2023 y diciembre de 2025. El archivo contiene 36 meses calendario, aunque uno de ellos, diciembre de 2024, no presenta dato válido. Por ese motivo, los análisis estadísticos se realizaron con 35 observaciones válidas.

La media global del período fue $9,211 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una mediana de $8,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un mínimo de $4,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de $17,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las medias anuales fueron $10,242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, $8,982 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024 —calculada sobre 11 meses válidos— y $8,392 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2025. En términos descriptivos, se observa una disminución de los promedios anuales, pero esta lectura debe ser contrastada con pruebas estadísticas de tendencia.

El Test de Mann-Kendall arrojó $S = -81$, $Z = -1,138$ y $p = 0,255$. Aunque el signo negativo del estadístico indica una posible orientación descendente, el resultado no es estadísticamente significativo para $\alpha = 0,05$. La serie presenta empates, por lo que la varianza de S fue corregida mediante el procedimiento correspondiente.

La Pendiente de Sen fue $-0,035 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{mes}$, equivalente a $-0,424 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$. El IC95% mensual fue de $-0,115$ a $0,040 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{mes}$. Al incluir el valor cero, este intervalo indica que no puede descartarse que la tendencia real sea nula. El Tau de Kendall fue $-0,137$, también compatible con una asociación temporal negativa débil y no significativa.

El análisis IQR identificó tres valores atípicos: septiembre de 2023 ($16,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y agosto de 2025 ($17,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como atípicos altos, y marzo de 2025 ($4,300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como atípico bajo. Los valores altos merecen revisión contextual, ya que podrían estar asociados a condiciones meteorológicas desfavorables, intrusiones de polvo, estabilidad atmosférica, episodios regionales, tráfico, obras urbanas o validación instrumental.

En conjunto, la estación Castellana muestra una disminución descriptiva de $\text{PM}_{2,5}$ entre 2023 y 2025, pero no puede afirmarse estadísticamente que exista una tendencia descendente significativa. Para sostener conclusiones de política pública sería recomendable ampliar la serie temporal, evaluar estacionalidad, revisar episodios extremos y comparar con otras estaciones de la red.

8. Informe para gestión ambiental municipal o provincial

El análisis de las concentraciones medias mensuales de $\text{PM}_{2,5}$ registradas en la estación Castellana de Madrid durante el período enero de 2023 a diciembre de 2025 muestra una situación con señales descriptivas de mejora, aunque sin confirmación estadística robusta. La media anual disminuye desde $10,242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 hasta $8,392 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2025, pasando por $8,982 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024. Esta evolución puede sugerir una reducción progresiva de los niveles medios de $\text{PM}_{2,5}$, pero debe interpretarse con cautela.

La aplicación del Test de Mann-Kendall, una herramienta no paramétrica adecuada para evaluar tendencias monotónicas en series ambientales, no detectó una tendencia estadísticamente significativa. La Pendiente de Sen estimó una disminución de $0,035 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por mes, equivalente a $0,424 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año, pero su intervalo de confianza incluye el valor cero. Esto significa que, con la información disponible, no puede descartarse que la reducción observada responda a variabilidad natural, condiciones meteorológicas particulares o fluctuaciones interanuales, más que a una mejora estructural consolidada.

Desde la perspectiva de la gestión ambiental, este resultado es importante porque evita una lectura excesivamente optimista basada únicamente en promedios anuales. La serie es corta —tres años, con un dato faltante— y puede estar influida por estacionalidad, episodios puntuales, cambios meteorológicos o condiciones locales de emisión. Por ello, los resultados deben considerarse como una señal preliminar, no como evidencia definitiva de éxito de políticas públicas.

El método IQR detectó tres valores atípicos: dos altos, en septiembre de 2023 y agosto de 2025, y uno bajo, en marzo de 2025. Los valores altos son especialmente relevantes para la gestión porque podrían corresponder a episodios de exposición elevada, con posible impacto sanitario y comunicacional. Estos eventos deberían revisarse junto con información meteorológica, episodios de polvo sahariano, tráfico, obras, incendios regionales o fallas instrumentales.

En términos de política pública, los resultados sugieren cuatro acciones prioritarias. Primero, mantener el monitoreo continuo de PM_{2,5} y extender el análisis a series más largas. Segundo, analizar específicamente los episodios atípicos para identificar sus causas probables. Tercero, complementar la evaluación de tendencia con análisis sanitario, especialmente considerando las recomendaciones de la OMS y herramientas como AirQ+. Cuarto, sostener medidas preventivas sobre fuentes urbanas relevantes: tráfico, combustión, calefacción, obras y resuspensión de partículas.

En síntesis, la serie no demuestra una tendencia descendente significativa, pero sí muestra niveles que justifican seguimiento activo y políticas sostenidas de reducción de exposición.

Resultados ANEXOS AL CASO #3

Aplicación del Test de Mann-Kendall estacional a la serie de PM_{2,5}

Estación Castellana, Madrid (Ene-2023 a Dic-2025)

Criterio de presentación: los cálculos fueron realizados con precisión interna y se reportan con hasta 3 decimales para facilitar la lectura técnica. El archivo contiene un dato faltante en DICIEMBRE_2024; por lo tanto, el análisis estacional utiliza 35 observaciones válidas distribuidas en 12 meses calendario.

1. Fundamento del método

El Test de Mann-Kendall clásico evalúa si una serie temporal completa presenta una tendencia monotónica ascendente o descendente. En series mensuales de calidad de aire, este enfoque puede mezclar meses naturalmente distintos entre sí, por ejemplo invierno contra verano, o meses con condiciones meteorológicas y patrones de emisión diferentes.

El Mann-Kendall estacional resuelve parcialmente ese problema al comparar cada mes únicamente contra el mismo mes de otros años: enero contra enero, febrero contra febrero, marzo contra marzo, y así sucesivamente. Luego suma los estadísticos mensuales para obtener un resultado global. Por eso, la pregunta que responde es: ¿existe una tendencia temporal consistente una vez controlado el efecto del mes del año?

2. Datos reordenados por mes

Mes	2023	2024	2025
Enero	8,600	11,600	8,500
Febrero	10,200	8,200	10,100
Marzo	7	8	4,300
Abril	6,500	6,800	5,100
Mayo	8,600	5,300	5,500
Junio	9,900	7,800	8,300
Julio	11	9,600	8,800
Agosto	8,600	11,100	17,600

Septiembre	16,300	8,100	8
Octubre	12,700	9,800	7,900
Noviembre	10,100	12,500	8
Diciembre	13,400	Sin dato	8,600

3. Procedimiento de cálculo

Para cada mes se aplicó un Mann-Kendall independiente. Si el valor más reciente es mayor que el anterior se suma +1; si es menor se suma -1; si es igual se suma 0. La suma de esos signos produce el estadístico S mensual. La varianza mensual se calcula con la expresión habitual de Mann-Kendall, aplicando corrección por empates cuando corresponda.

Ejemplo con julio: 2023 = 11,000; 2024 = 9,600; 2025 = 8,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las tres comparaciones intra-mensuales son negativas, por lo que $S_{\text{julio}} = -3$. Esto indica un descenso consistente de julio a julio durante el período observado.

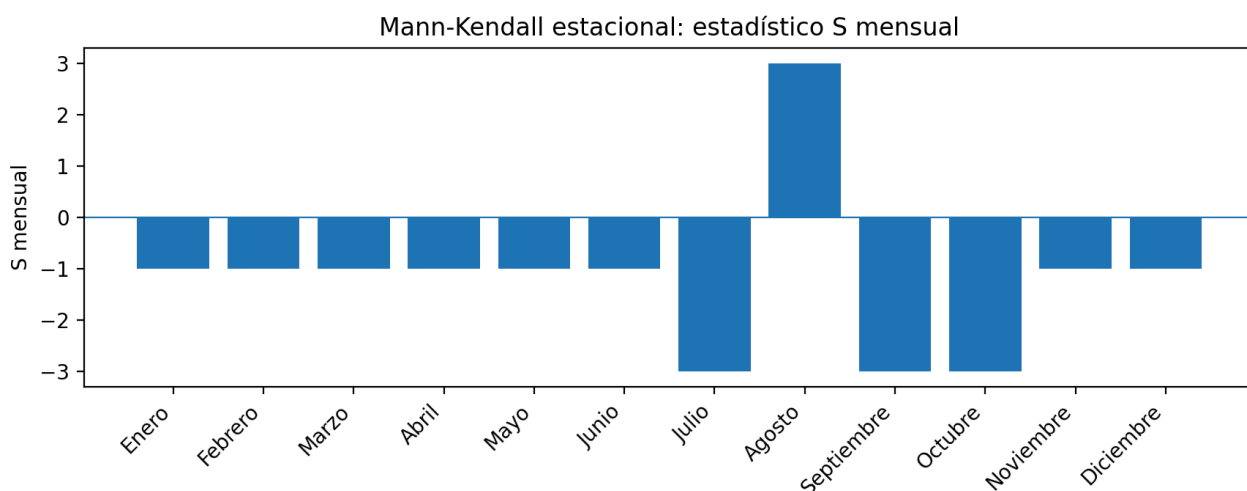
Finalmente, se suman los S mensuales para obtener S estacional total, y se suman las varianzas mensuales para obtener Var(S) estacional. Con esos dos valores se calcula Z y el p-valor bilateral.

4. Resultados por mes

Mes	n válido	Comparaciones	S mensual	Var(S) mensual	Pares +	Pares -
Enero	3	3	-1	3,667	1	2
Febrero	3	3	-1	3,667	1	2
Marzo	3	3	-1	3,667	1	2
Abril	3	3	-1	3,667	1	2
Mayo	3	3	-1	3,667	1	2
Junio	3	3	-1	3,667	1	2
Julio	3	3	-3	3,667	0	3
Agosto	3	3	3	3,667	3	0
Septiembre	3	3	-3	3,667	0	3
Octubre	3	3	-3	3,667	0	3
Noviembre	3	3	-1	3,667	1	2
Diciembre	2	1	-1	1,000	0	1

Nota: no se identificaron empates dentro de los grupos mensuales. Diciembre presenta solo dos observaciones válidas debido al dato faltante de 2024.

Figura 1. Estadístico S mensual



5. Resultado global del Mann-Kendall estacional

Parámetro	Resultado
Número de meses/estaciones comparadas	12
Observaciones válidas	35
Número total de comparaciones intra-mensuales	34
S estacional total	-14
Var(S) estacional	41,333
Z estandarizado	-2,022
p-valor bilateral	0,043
Alfa	0,050
Tendencia estadísticamente significativa	Sí
Sentido de la tendencia	Descendente

Interpretación: al comparar cada mes contra el mismo mes de años posteriores, el resultado global indica una tendencia descendente estadísticamente significativa ($p = 0,043$). Esto sugiere que, una vez controlado el efecto del mes del año, la serie muestra una señal de reducción de $PM_{2,5}$ durante 2023-2025.

6. Pendiente estacional de Sen

Parámetro	Resultado
Número de pendientes intra-mensuales	34
Pendiente estacional de Sen	-1,075 $\mu g/m^3/año$
Interpretación	Reducción mediana aproximada de 1,075 $\mu g/m^3$ por año al comparar meses equivalentes

La pendiente estacional de Sen se calculó como la mediana de todas las pendientes entre pares de datos del mismo mes. Por ejemplo, se calcularon pendientes enero-enero, febrero-febrero, marzo-marzo, etc. La estimación central resultó más negativa que la Pendiente de Sen clásica calculada sobre la serie completa, porque el procedimiento evita comparaciones entre meses con comportamiento estacional distinto.

7. Comparación con el Mann-Kendall clásico del Caso #3

Método	S	Z	p-valor	Conclusión
Mann-Kendall clásico	-81	-1,138	0,255	No significativo
Mann-Kendall estacional	-14	-2,022	0,043	Significativo, descendente

El resultado cambia porque el Mann-Kendall clásico compara todos los meses contra todos, mezclando variación estacional con tendencia temporal. En cambio, el Mann-Kendall estacional compara meses equivalentes. En esta serie, esa forma de comparación revela una señal descendente más clara.

8. Interpretación para gestión ambiental

Desde el punto de vista de la gestión de calidad de aire, el resultado es ilustrativo: la serie mensual de PM_{2,5} de Castellana no mostró tendencia significativa con el Mann-Kendall clásico, pero sí la mostró al aplicar el Mann-Kendall estacional. Esto no significa que un método sea “verdadero” y el otro “falso”, sino que responden preguntas distintas. El método clásico evalúa la serie completa mezclando todos los meses; el método estacional evalúa si cada mes tiende a mejorar o empeorar respecto del mismo mes en otros años. Para indicadores ambientales mensuales, el método estacional puede ser más adecuado cuando existe estacionalidad esperable. En calidad de aire, esa estacionalidad puede relacionarse con meteorología, estabilidad atmosférica, calefacción, tráfico, polvo en suspensión, intrusiones regionales u otros factores que cambian según el mes.

La principal advertencia es que la serie disponible contiene solo tres años de datos, y diciembre tiene únicamente dos observaciones válidas. Por ello, el resultado debe considerarse didáctico y exploratorio. Para una evaluación de política pública más robusta sería conveniente contar con series más largas, idealmente de cinco a diez años, y complementar el análisis con información meteorológica, fuentes emisoras, episodios de intrusión de polvo y validación instrumental.

9. Conclusión del anexo

El Mann-Kendall estacional es una extensión útil del Mann-Kendall clásico para series mensuales o trimestrales. En el Caso #3 permite mostrar que, al controlar el efecto del mes, la serie de PM_{2,5} en Castellana presenta una tendencia descendente estadísticamente significativa. Como herramienta de gestión, resulta especialmente recomendable cuando se analizan indicadores ambientales con ciclos estacionales claros.

Nota: Los RESULTADOS reportados para los Casos #1, #2 y #3 (incluido el Anexo) (textos en *itálica* en las páginas anteriores), fueron generados por la aplicación de IA ChatGPT de OpenAI (www.openai.com) utilizando los prompt/solicitudes que se consignaron en las respectivas tablas de especificación de cada Caso. Y se incluyen en este Manual sin modificación alguna.

4. Sugerencias para considerar respecto de los datos, los prompt y los reportes de resultados de la IA

- ◆ Es más que adecuado y necesario hacer una mínima revisión inicial sobre la calidad de los datos antes de proceder con el análisis de tendencia. Por ejemplo: revisar unidades, años faltantes, cambios de método analítico, estaciones de monitoreo, redondeos, límites de detección y consistencia temporal. Esto es clave porque un resultado estadístico prolijo puede ser engañoso si los datos de la serie no son comparables y/o se duda sobre la representación y veracidad de los valores a estudiar.
- ◆ Observar que en los prompt/solicitudes especificadas se consignan en letra itálica los textos aplicables que mejor describen el Caso en cuestión. Se sugiere adaptar esas frases en itálica al caso que el usuario quiera resolver.
- ◆ Tomar muy en cuenta el número de datos de la serie temporal a estudiar. Ese número idealmente debería estar entre 10 y 40. Los resultados obtenidos a partir de series que contengan entre 5 y 10 datos deben considerarse sólo indicativos, aún cuando los indicadores estadísticos resulten significativos para $p = 0,05$. El análisis de tendencia en series de más de 50 datos podría resultar en elevados tiempos de cálculo, además de que las series largas podrían presentar problemas de autocorrelación o falta de independencia como se explica más abajo. Si ese es el caso, tratar de agrupar datos tomando promedios, medianas y/o medias geométricas.
- ◆ En caso de que los tiempos entre datos de la serie no sean iguales, es importante consignar explícitamente bien las fechas y/o las unidades del eje de tiempo. Si se trata de meses, consignar, por ejemplo: 1, 3, 4, 7, 11, 15... El detalle es importante en particular para obtener resultados adecuados al estimar la Pendiente de Sen.
- ◆ El análisis de tendencia en series de datos que se ha desarrollado es particularmente aplicable a datos de promedios diarios, mensuales o anuales de indicadores ambientales. Los procedimientos Mann-Kendall presuponen independencia entre datos consecutivos de las series estudiadas. Si existe autocorrelación importante entre los datos (sucede cuando los datos provienen de series de alta frecuencia de muestreo, por ejemplo: tomar un dato cada minuto o cada 10 minutos), la significancia de la tendencia puede sobreestimarse; en ese caso conviene aplicar procedimientos que condensen datos como tomar medias, medianas o medias geométricas.

- ◆ También puede existir “estacionalidad” en la serie de datos a considerar. Suele suceder cuando se estudian datos de promedios o medianas mensuales o estacionales (verano-otoño-invierno-primavera) de algunos indicadores ambientales. Si este es el caso esa especial característica de los datos puede filtrarse. Ver en especial el Anexo del Caso #3.

- ◆ Recomendaciones prácticas para la interpretación de resultados:
 - i) En el Análisis de Tendencia de Mann-Kendall $p < 0,05$ y el IC95% de la Pendiente de Sen no incluye el valor 0, entonces la tendencia de la serie consistente;
 - ii) Si $p \geq 0,05$ en Mann-Kendall, pero la Pendiente de Sen sugiere tendencia, creciente o decreciente según el caso, entonces se trata de una señal indicativa. Se requieren más datos.
 - iii) Si hay valores atípicos (“outliers” en inglés), tal vez convenga quitarlos de la serie y volver a realizar los cálculos. También es importante investigar las posibles razones que puedan justificar la presencia de valores atípicos, tales como errores de toma de muestra y/o medición.
 - iv) Si el valor absoluto de T_b es alto, valor entre 0,6 y 1,0; pero el IC95% del T_b incluye el valor 0 entonces es posible que la serie tiene un insuficiente número de datos.

- ◆ Es pertinente controlar el contenido de los reportes que entregan las aplicaciones de IA. Una primera verificación es asegurarse que la serie con la que la aplicación de IA realizó los cálculos es la serie que de verdad se quiere estudiar. Una evaluación al menos cualitativa de la razonabilidad de la gráfica solicitada contribuye a confiar en los valores reportados por el análisis de tendencia.

- ◆ Este manual es especialmente útil para series temporales con datos faltantes o lagunas de información (por ejemplo, meses donde el laboratorio encargado de los análisis no operó por falta de reactivos, o no se tomaron muestras por baja del técnico encargado) y para series con alta frecuencia de empates (común en el monitoreo de contaminantes microbiológicos), condiciones donde la estadística tradicional falla pero los métodos basados en rangos aquí descritos demuestran su robustez.

5. Referencias bibliográficas

-Siegel, S. y Castellan, N. J. (1995). Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta (4ta. ed.). México: Editorial Trillas.

-Sheskin, D. J. (2011/2020). Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures (5th ed.). Boca Raton: Chapman & Hall/CRC / Taylor & Francis.

Estas obras permiten profundizar en los fundamentos de la estadística no paramétrica, especialmente en pruebas basadas en rangos, empates, medidas de asociación ordinal y Tau de Kendall. Para aplicaciones específicas en series ambientales, el Test de Mann-Kendall puede entenderse como una prueba no paramétrica de tendencia monotonica basada en la lógica de Kendall, mientras que la Pendiente de Sen constituye una estimación robusta de la magnitud del cambio asociada a esa familia de métodos.

Las referencias propuestas no se tratan de libros enfocados en lo “ambiental” específico, sino de manuales estadísticos en general.

Adicionalmente, para profundizar en los fundamentos estadísticos y ambientales de los métodos no paramétricos utilizados en este manual, se recomienda consultar el recurso de acceso libre del U.S. Geological Survey: Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., & Gilroy, E. J. (2020). Statistical Methods in Water Resources. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 4, Chapter A3. Este texto aborda el análisis estadístico de datos ambientales e hidrológicos, incluyendo métodos robustos y no paramétricos, Tau de Kendall, estimadores tipo Theil-Sen/Sen y pruebas de tendencia como Mann-Kendall. Enlace: <https://pubs.usgs.gov/publication/tm4A3>