

Estudio sobre la contaminación de las aguas del río Tajo a su paso por Toledo y posibles causas de la generación de espumas

Mayo de 2024

Beatriz Martín, Raúl Urquiaga, Beatriz Larraz e Irene Bernal



Cátedra del
tajo

Universidad de Castilla-La Mancha  Fundación SOLISS



Estudio sobre la contaminación de las aguas del río Tajo a su paso por Toledo (España) y posibles causas de la generación de espumas

Mayo de 2024

Beatriz Martín^{1,2}, Raúl Urquiaga^{1,3}, Beatriz Larráz^{1,3} e Irene Bernal^{1,3}

¹Cátedra del Tajo UCLM-Soliss; ² Universidad Alfonso X El Sabio; ³ Universidad de Castilla-La Mancha



Índice

1. Introducción	7
2. Descripción de la zona de estudio.....	10
3. Datos y metodología	12
4. Resultados.....	20
4.1. Evaluación de vertidos autorizados que soporta el tramo medio del río Tajo	20
4.2. Análisis espaciotemporal de contaminantes en el tramo medio del río Tajo a través de la Red CEMAS	24
4.2.1 Concentración de nutrientes en el tramo medio del río Tajo.....	24
4.2.2. Concentraciones del tensoactivo sulfonato de alquilbenceno lineal en el tramo medio del río Tajo.....	30
4.3. Análisis temporal de parámetros fisicoquímicos en las estaciones de Safont (río Tajo en Toledo) y Puente Largo (río Jarama en Aranjuez). Comparativa en el periodo 2013-2022.	30
4.3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos durante los episodios de espumas.....	40
4.3.2. Análisis cuantitativo de variables en episodios de espumas.....	44
4.3.3. Análisis cualitativo de variables en episodios de espumas.....	48
4. Conclusiones	51
5. Referencias.....	55



Índice de figuras

Figura 1. Espumas en el río Tajo a su paso por Toledo en el Puente de San Martín en octubre de 2016 (a) y en el Puente de Alcántara en junio de 2022 (b).	10
Figura 2. Mapa de situación de la zona de estudio	11
Figura 3. Caudal medio anual (m^3/s) en el río Tajo a su paso por Aranjuez desde 1954 a 2020.	11
Figura 4. Mapa de la ciudad de Toledo en el que se sitúan los nueve azudes actuales del cauce del Tajo.	12
Figura 5. Estaciones de aforos en la zona de estudio.	14
Figura 6. Estaciones de la Red CEMAS en la zona de estudio.	15
Figura 7. Estaciones de la Red SAICA utilizadas en el estudio.	16
Figura 8. Vertidos autorizados en la cuenca vertiente al río Tajo a su paso por Toledo. Isla de calor realizada a partir del volumen de vertido autorizado anual (m^3/s).	22
Figura 9. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez 1-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	24
Figura 10. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez 2-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	25
Figura 11. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez-Jarama y cumplimiento de objetivos medioambientales.	25
Figura 12. Concentración de nutrientes en la estación Añover-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	25
Figura 13. Concentración de nutrientes en la estación Mocejón-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	26
Figura 14. Concentración de nutrientes en la estación Villaseca-Guatén y cumplimiento de objetivos medioambientales.	26
Figura 15. Concentración de nutrientes en la estación Villasequilla-Martín Román y cumplimiento de objetivos medioambientales.	26
Figura 16. Concentración de nutrientes en la estación Toledo-Guazaleta y cumplimiento de objetivos medioambientales.	27
Figura 17. Concentración de nutrientes en la estación Toledo 1-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	27
Figura 18. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez-Algodor y cumplimiento de objetivos medioambientales.	27
Figura 19. Concentración de nutrientes en la estación Toledo 2-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	28
Figura 20. Concentración de nutrientes en la estación Toledo 2-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.	28
Figura 21. Vertidos totales autorizados al año en el tramo medio del río Tajo. Se incluye la aportación inicial del Jarama y del propio Tajo antes de la desembocadura.	29
Figura 22. Concentración de sulfonato de alquibenceno lineal (mg/l) en las estaciones de la Red CEMAS de Aranjuez-Jarama, Mocejón-Tajo y Toledo 1-Tajo.	30



Figura 23. Variación de la temperatura ($^{\circ}$ C) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	31
Figura 24. Comparación de las medianas anuales de la temperatura ($^{\circ}$ C) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).	31
Figura 25. Variación del pH en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	32
Figura 26. Comparación de las medianas de pH en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).	32
Figura 27. Variación de la conductividad (μ S/cm) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	33
Figura 28. Comparación de las medianas de conductividad (μ S/cm) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).	33
Figura 29. Variación de oxígeno disuelto (mg/L) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	34
Figura 30. Comparación de las medianas de oxígeno disuelto (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (izquierda) y de Safont (derecha) de la Red SAICA (2014-2021).	34
Figura 31. Variación de turbidez (UNF) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	35
Figura 32. Comparación de las medianas de turbidez (UNF) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).	35
Figura 33. Variación de amonio (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	37
Figura 34. Comparación de las medianas de amonio (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (izquierda) y de Safont (derecha) de la Red SAICA (2014-2021).	37
Figura 35. Variación de fosfatos (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).	38
Figura 36. Comparación de las medianas de fosfatos (mg/l) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).	38
Figura 37. Variación de nitratos (mg/l) en la estación SAICA de Safont (2014-2021). (a) Serie completa; (b) serie en la que han suprimido los valores >100 mg/l.	39
Figura 38. Comparación de las medianas de nitratos (mg/l) en la estación SAICA de Safont (2016-2021). Fuente CHT. Elaboración propia.	40
Figura 39. Box and whiskers-plot de los distintos parámetros fisicoquímicos para la serie completa en Safont en el periodo 2014-2021.	41
Figura 40. Caudales medios diarios circulantes en la estación de Puente de Algodor (río Tajo).	43
Figura 41. Análisis comparativo entre coeficientes de correlación correspondientes a la serie completa en los meses fríos (a) y a la serie con episodios de espuma registrados (b).	45
Figura 42. Comparación de la distribución de la serie en Safont en los meses de octubre a febrero, ambos inclusive (box-plot izquierda) y la serie de los episodios de espumas detectados en los mismos meses (box-plot derecha) para los parámetros fisicoquímicos.	47



Figura 43. Concentración de amonio (mg/l) durante los episodios de espumas registrados en Toledo. Comparativa entre las estaciones de la Red SAICA de Puente Largo (32 horas antes, ± 6 horas) y Safont (2016-2021)..... 49

Figura 44. Concentración de fosfatos (mg/l) durante los episodios de espumas registrados en Toledo. Comparativa entre las estaciones de la Red SAICA de Puente Largo (32 horas antes, ± 6 horas) y Safont (2016-2021)..... 51

Índice de tablas

Tabla 1. Fuente de datos, variables y periodo del análisis	13
Tabla 2. Parámetros consignados en cada estación de muestreo de la Red SAICA.....	17
Tabla 3. Límites de cambio de estado.....	18
Tabla 4. Episodios de espumas en Toledo y existencia de datos fisicoquímicos en las estaciones de control de la Red SAICA.	19
Tabla 5. Criterio para el establecimiento de las categorías de la transformación de las observaciones cuantitativas de amonio y fosfatos en carácter cualitativo.....	20
Tabla 6. Vertidos autorizados en la cuenca del río Jarama	21
Tabla 7. Vertidos autorizados en la cuenca del río Tajo desde Aranjuez hasta la ciudad de Toledo.....	21
Tabla 8. Relación de caudales medios y vertidos autorizados en el tramo medio del río Tajo.	23
Tabla 9. Matriz de coeficientes de correlación entre las variables dos a dos en la serie completa en Safont en el periodo 2014-2021.	42
Tabla 10. Caudal medio diario en Toledo y percentil que ocupan respecto del correspondiente mes durante los episodios de espumas.	43
Tabla 11. Contraste de diferencia de medias entre la serie completa de octubre a febrero de 2014 a 2021 y la serie de episodios de espumas en esos meses.	47
Tabla 12. Análisis cualitativo de los parámetros fisicoquímicos del río Jarama en su desembocadura (estación de Puente Largo) y del río Tajo en Toledo (estación de Safont)	50



1. Introducción

Desde los años 70, el río Tajo es un curso con graves problemas ambientales. Como consecuencia de la industrialización, la concentración de población en grandes núcleos urbanos, las extracciones agrarias y la contaminación por actividades agrícolas y ganaderas, el Tajo se encuentra con un caudal mermado, degradado ambientalmente, contaminado y con su dinámica fluvial muy alterada (Larraz et al., 2015). Las aguas del río Tajo a su paso por Toledo (España) se encuentran con un nivel de contaminación muy alto, con sus riberas degradadas, desconectadas, alteradas y con una sistemática falta de caudal que le hace encontrarse alejado de sus condiciones naturales, previas a la acción del ser humano (Gallego, 2013; Larraz et al., 2015; San Martín et al., 2020). Los problemas más importantes vienen generados por la detracción de caudal del trasvase Tajo-Segura, la entrada de aguas residuales depuradas, principalmente del área metropolitana de Madrid, y la concatenación de embalses hidroeléctricos en el tramo bajo español (a su paso por Extremadura), agravados por el impacto del cambio climático (Gallego, 2013; San Martín et al., 2020).

El entorno metropolitano de Madrid, que se acerca ya a los siete millones de habitantes (INE, 2023), representa el 82 % de la población de la cuenca y se encuentra concentrada en su parte media-alta, siendo la principal área urbana e industrial del país. Dos de sus cuencas (las de los ríos Jarama y Guadarrama) recogen la práctica totalidad de los vertidos de la región madrileña, y estos desembocan en el río Tajo. Los sistemas de depuración de la Comunidad Autónoma de Madrid, pese a tratar la práctica totalidad del agua residual urbana en la región, con un total de 158 Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) (Comunidad de Madrid, 2021), son incapaces de evitar que los ríos Jarama y Guadarrama fluyan con una alta concentración de contaminantes fisicoquímicos mayor a la permitida (Urquiaga, 2013 y Larraz et al., 2023). Tras el vertido de las depuradoras, estos cursos pueden considerarse, más que ríos, colectores de efluentes residuales (Díez-Mayans y Bienes, 2003).

Además de los vertidos de origen urbano e industrial, hay que señalar el impacto de la contaminación difusa proveniente de la agricultura y ganadería (Arauzo et al., 2008; Arenas-Sánchez et al., 2019), principalmente por el uso de nitratos y sustancias derivadas de los fitosanitarios. El 37 % de las masas de agua superficial de la Demarcación Española de la cuenca del Tajo estarían afectadas por contaminaciones de origen agrícola o ganadero con resultados por encima de 5 mg de Nitrógeno total/l y de 22,1 mg/l de nitratos (CHT, 2020).

La alta proporción de aguas residuales, con una elevada concentración de contaminantes (Arenas-Sánchez et al., 2019; Valcárcel et al., 2012) en la cuenca del Jarama es señalada como la principal causa del incumplimiento de los objetivos ambientales de calidad en las aguas del río Tajo en su curso medio (Bolinches, 2019). Este autor demuestra que con los niveles actuales de depuración y, aunque se cumplieran los niveles exigidos en efluente en cada depuradora, no se llegaría a alcanzar el buen estado en las aguas del tramo medio del río Tajo. El problema se genera porque la normativa sobre tratamiento de aguas atiende solamente a los efluentes individuales de cada una de las depuradoras, pero se olvida de los efectos acumulativos y de que las aguas receptoras deben cumplir con el buen estado tras el vertido (Bolinches et al., 2020).



La falta de calidad de agua del río Tajo a su paso por Toledo ya viene señalada en la evaluación de la calidad de las masas de agua que la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), organismo público encargado de su gestión, realiza en los distintos ciclos de planificación hidrológica. En estos (CHT 2015; CHT, 2016; CHT, 2023), la calidad ecológica del río siempre ha estado en valores por debajo de los objetivos medioambientales en aplicación de la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000).

Este problema de alta acumulación de vertidos interacciona negativamente con el otro principal problema que sufre el río Tajo: la importante falta de dinámica fluvial y detracción de caudales como consecuencia del trasvase Tajo-Segura. En el año 1980 se comenzó a derivar agua desde la cabecera del Tajo hacia el sureste de la península Ibérica, viéndose mermado así el caudal circulante por el eje del Tajo y, por tanto, su capacidad de dilución y autodepuración. La actual gestión del trasvase Tajo-Segura impide el cumplimiento de los objetivos medioambientales de la DMA en el río Tajo (de Lucas, 2019).

En este contexto de contaminación y falta de caudal, en la ciudad de Toledo ocurren eventos de aparición de espumas que causan un gran impacto social en la opinión pública (Camiñas, 1989; Corral, 2016; Manjavacas, 2022) y deterioran la imagen de esta ciudad Patrimonio de la Humanidad desde 1986. La presencia de estos cada vez más recurrentes episodios de espumas en el río Tajo, que es considerado como el principal patrimonio natural de la ciudad, hace imprescindible la dedicación de esfuerzos a intentar conocer su origen.

En la literatura se conoce que las espumas asociadas a los medios acuáticos pueden ser naturales o artificiales. Las espumas naturales suelen estar ligadas a sustancias de ácidos húmicos y fúlvicos (Ettema et al., 1989; Napolitano y Richmond, 1995), partículas coloidales finas (Ettema et al., 1989), lípidos y proteínas procedentes de plantas acuáticas o terrestres lixiviadas del suelo. También pueden estar causadas por eventos de precipitaciones (Napolitano y Richmond, 1995), saponinas, que representan una familia de glucósidos vegetales (Pojasek y Zajicek, 1978; Wegner y Hamburger, 2002), la exudación o productos de descomposición del fitoplancton que contiene carbohidratos y proteínas (Bätje y Michealis, 1986; Eberlein et al., 1985; Seuront et al., 2006) y el reservorio natural de materia orgánica que se encuentra en los sedimentos (Napolitano y Richmond, 1995). Dentro de las fuentes artificiales, han sido señalados los fosfatos de los fertilizantes agrícolas (Ettema et al., 1989) y la contaminación orgánica e inorgánica (tensoactivos presentes en detergentes, productos de cuidado personal, pinturas, industria textil, pesticidas, polímeros, productos farmacéuticos, minería, industria petrolífera, papelera, etc. (Ríos, 2014)) de vertidos puntuales (Ettema et al., 1989; Madrange et al., 1992; Ruzicka et al., 2009).

Teniendo en cuenta el hecho de que la formación de espuma aparece como efecto de la suma de los compuestos tensoactivos presentes en el agua, en la mayoría de los casos la responsable de la formación de espuma no es una sola sustancia, sino una mezcla de varios componentes, (Wegner y Hamburger, 2002). En general, la espuma de los ríos viene determinada tanto por procesos naturales como por la contaminación causada por la actividad humana (Fisenko, 2004), debiéndose a una combinación de: materia orgánica natural y contaminación orgánica (aguas residuales, residuos domésticos, escorrentía de instalaciones ganaderas, jabones, etc.), la actividad de bacterias, hongos y microorganismos descomponedores de la materia orgánica, presencia de contaminantes inorgánicos (por



ejemplo, detergentes, aceites y contaminación química) y un nivel adecuado de flujo turbulento. La turbulencia es necesaria para que se generen burbujas y aire y se formen agregados de burbujas y partículas (orgánicas e inorgánicas). Los tensoactivos (también llamados surfactantes) pueden crear una película protectora estable alrededor de cada burbuja, que dará el resultado de la espuma en superficie. En definitiva, la cantidad de espuma formada en la superficie del agua de un río depende de la concentración de tensoactivos (naturales o artificiales) y de las burbujas de aire generadas por turbulencia (Fisenko, 2004). Es necesaria una conjunción de características físicas (temperatura del agua y caudal) y químicas (presencia de tensoactivos y demás contaminantes) junto con elementos que generen turbulencia para observar espumas. Es decir, con la misma caracterización química, con alta concentración de contaminantes, pueden unas veces generarse espumas y otras no, porque ante un mismo comportamiento químico, también afecta la física.

De todos los posibles motivos de la presencia de espumas, en este informe se explora la posibilidad de que el origen de las que aparecen en el río Tajo a su paso por Toledo pueda ser debido a la mala calidad de las aguas del río Tajo que la literatura atribuye a las estaciones de depuración de Madrid, a la que hay que añadir los vertidos de la provincia de Guadalajara (aguas arriba de Madrid) y de la provincia de Toledo. Sin descartar el origen natural de las espumas en algunos momentos puntuales, hay que tener en cuenta que el río Tajo antes de su confluencia con el río Jarama presenta condiciones de turbulencia que podrían producir espumas y, sin embargo, a esa altura del río no se dan estos episodios (azudes históricos de Aranjuez), mientras que, en la desembocadura del Jarama, sí han podido ser observadas (Puente Largo de Aranjuez).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es avanzar en la determinación del origen de las espumas presentes en el río Tajo a su paso por la ciudad de Toledo con el fin de contribuir a la mejora del conocimiento para la búsqueda de soluciones. Esta realidad puede interpretarse como una oportunidad de contribuir a la literatura a través de este caso de estudio, siendo el fin último la desaparición de aquellas condiciones que son causantes de las citadas espumas.

En primer lugar, se lleva a cabo, a partir de los datos oficiales disponibles, un análisis del grado de contaminación del río en su tramo medio. Para ello se parte desde la confluencia con el río Jarama, al ser la principal entrada de aguas residuales. A continuación, se realiza un análisis detallado durante los episodios de espumas, con el fin de detectar algún patrón de comportamiento común, que permita conocer qué circunstancias especiales ocurren esos días, si es que las hay.

2. Descripción de la zona de estudio

La ciudad de Toledo (España) se sitúa en el centro de la península ibérica y cuenta con una población de 86.070 habitantes (INE, 2023). Su patrimonio histórico-artístico y paisajístico le valió en 1986 el título de ciudad Patrimonio de la Humanidad (UNESCO, 1986), lo que la convierte en uno de los principales destinos turísticos en España y del mundo. A pesar de ello, su principal patrimonio natural, el río Tajo, que rodea su casco histórico, se encuentra en mal estado ecológico a su paso por la ciudad, hecho muy grave en sí mismo, que resta atractivo turístico y, lo que es más importante, no puede proporcionar a la ciudadanía los beneficios de un ambiente saludable (Aguilar, et al. 2024). Indiscutiblemente, como puede apreciarse en la Figura 1, los fenómenos de presencia de espumas provocan alarma y rechazo en la sociedad.

Figura 1. Espumas en el río Tajo a su paso por Toledo en el Puente de San Martín en octubre de 2016 (a) y en el Puente de Alcántara en junio de 2022 (b).

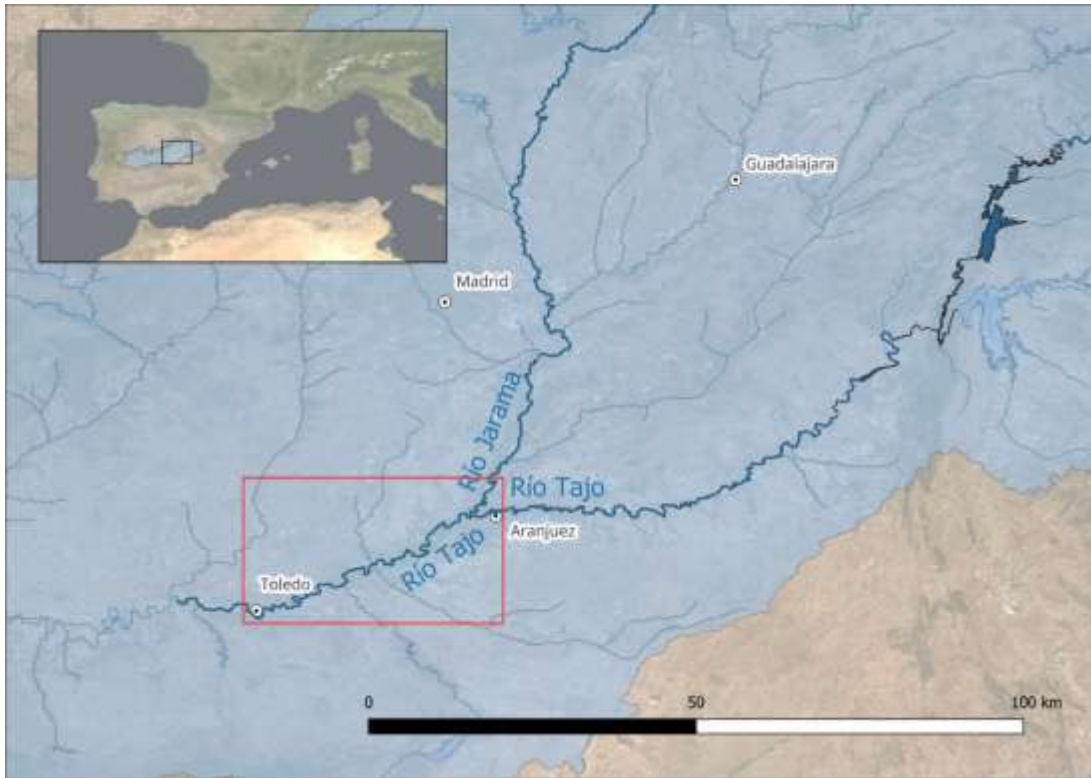


Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss

La Figura 2 muestra la localización del río Tajo en la Península Ibérica, desde su cabecera hasta la ciudad de Toledo y su principal afluente por la margen derecha, el río Jarama, que recoge el efluente de todas las depuradoras de la provincia de Madrid (excepto las de la zona oeste, que vierten a la cuenca del río Guadarrama) y de la provincia de Guadalajara a través del río Henares. Este río Jarama desemboca a la altura de Aranjuez, en un río Tajo que ha visto reducido de forma alarmante su caudal desde el año 1980 como consecuencia de la puesta en funcionamiento del trasvase Tajo-Segura (véase Figura 3).

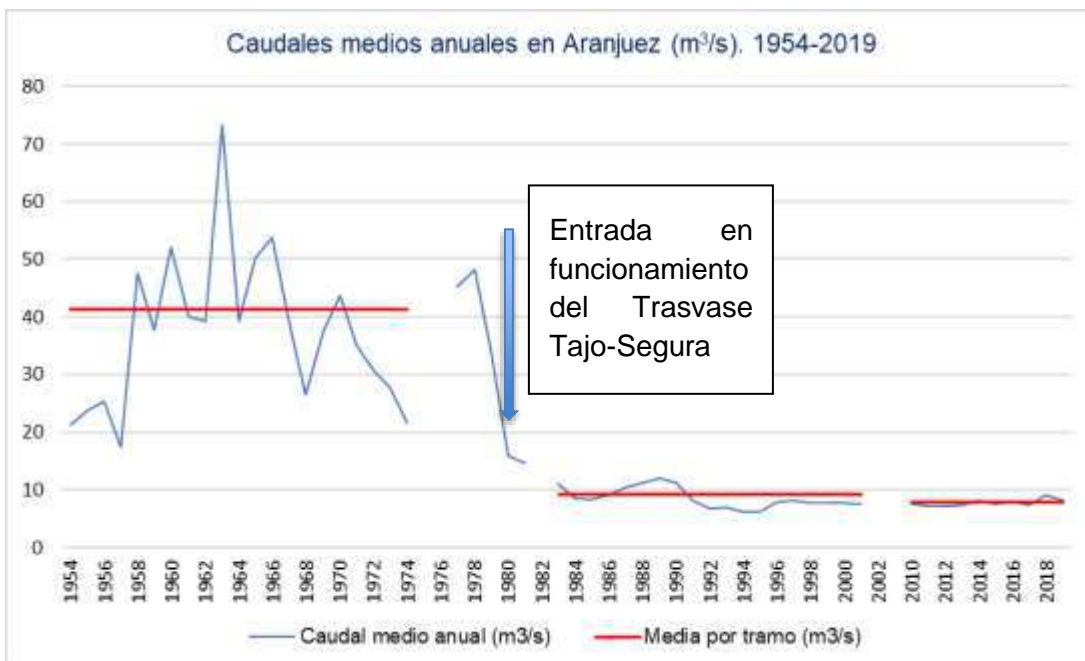
En la ciudad de Toledo se da, además de la mala calidad de sus aguas que recoge la literatura, el otro elemento necesario para la aparición de espumas de origen artificial: fuentes de turbulencia. Así, existen nueve azudes que baten el agua. Su origen es, en muchos casos medieval, estando relacionados con la presencia de molinos en la ribera, o de principios del siglo XX, en otros, para la generación de energía hidroeléctrica (Figura 4).

Figura 2. Mapa de situación de la zona de estudio



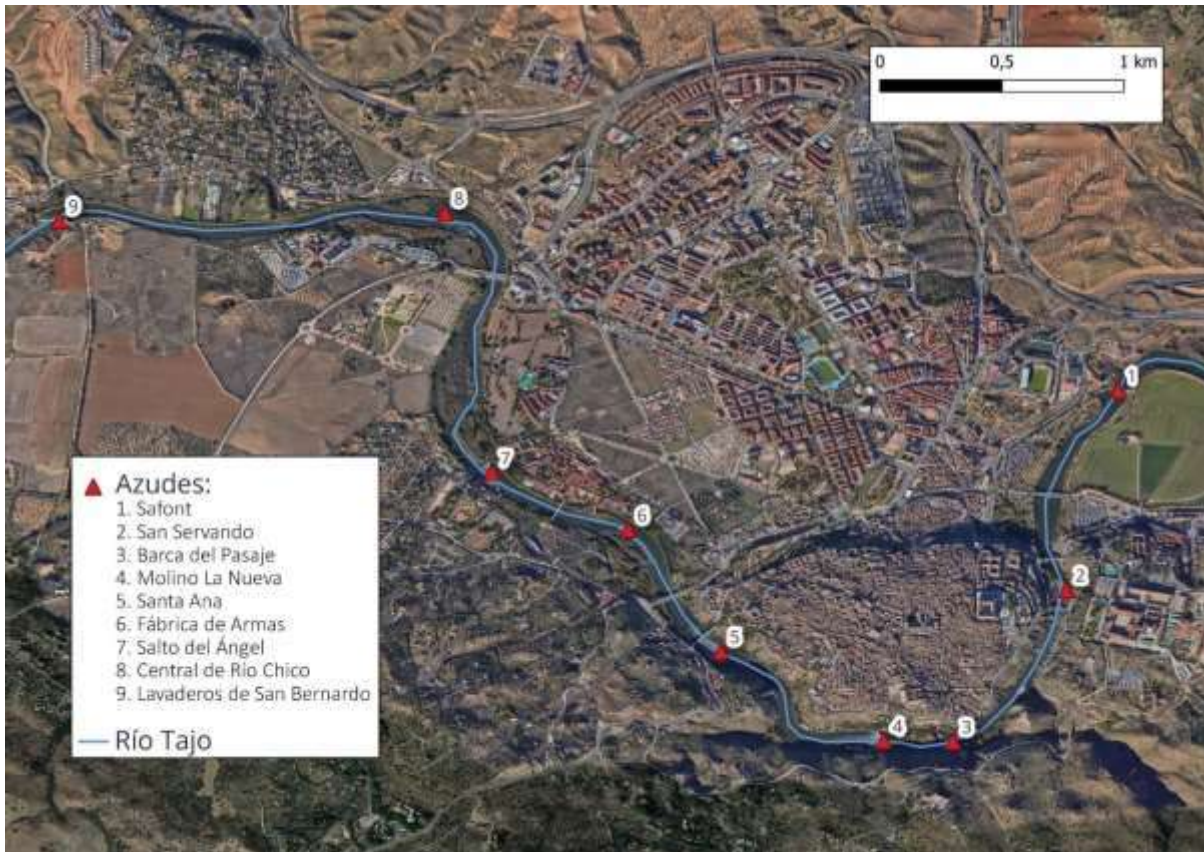
Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss

Figura 3. Caudal medio anual (m^3/s) en el río Tajo a su paso por Aranjuez desde 1954 a 2020.



Fuente: Elaboración propia con datos procedentes del CEDEX.

Figura 4. Mapa de la ciudad de Toledo en el que se sitúan los nueve azudes actuales del cauce del Tajo.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss.

3. Datos y metodología

En esta investigación se ha realizado un análisis cuantitativo y cualitativo de los datos oficiales disponibles, tanto relacionados con caudales y vertidos como con las características fisicoquímicas del agua, utilizando las series temporales más largas posibles. La información ha sido ofrecida por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) a través de su Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) y por la Confederación Hidrográfica del Tajo, organismos adscritos al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico del gobierno de España. La Tabla 1 recoge las variables, periodos y fuentes de información que han sido consideradas en este trabajo.



Tabla 1. Fuente de datos, variables y periodo del análisis

Tema	Fuente	Ámbito	Variable	Periodo	Periodicidad	Nº Estaciones
Caudales	Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) (CEDEX, 2023)	Río Tajo (y afluentes) desde Aranjuez a Toledo	Caudal (m ³ /s)	1999-2020	Medias diarias	9 (Figura 5)
Vertidos	Censo de Vertidos autorizados (CHT, 2021)	Cuenca vertiente hasta la ciudad de Toledo	Vertido autorizado (m ³ /año)	2021	Anual	396 puntos de vertido
Concentración de contaminantes fisicoquímicos	Red CEMAS (Red de control de calidad fisicoquímica) (CHT, 2022a)	Río Tajo (y afluentes) desde Aranjuez a Toledo	Amonio (mg/l); Fosfatos (mg/l); Nitratos (mg/l)	2016-2020	Variable, según estaciones, entre 2 y 12 mediciones al año	11 (Figura 6)
Parámetros fisicoquímicos	Red SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) (CHT, 2022b)	Río Tajo (y afluentes) desde Aranjuez a Toledo	Temperatura (° C); pH; Conductividad (µS/cm); Oxígeno (mg/l); Turbidez (NTU); Amonio (mg/l); Fosfatos (mg/l); Nitratos (mg/l)	2013-2022	Quinceminutales*	8 (Figura 7)

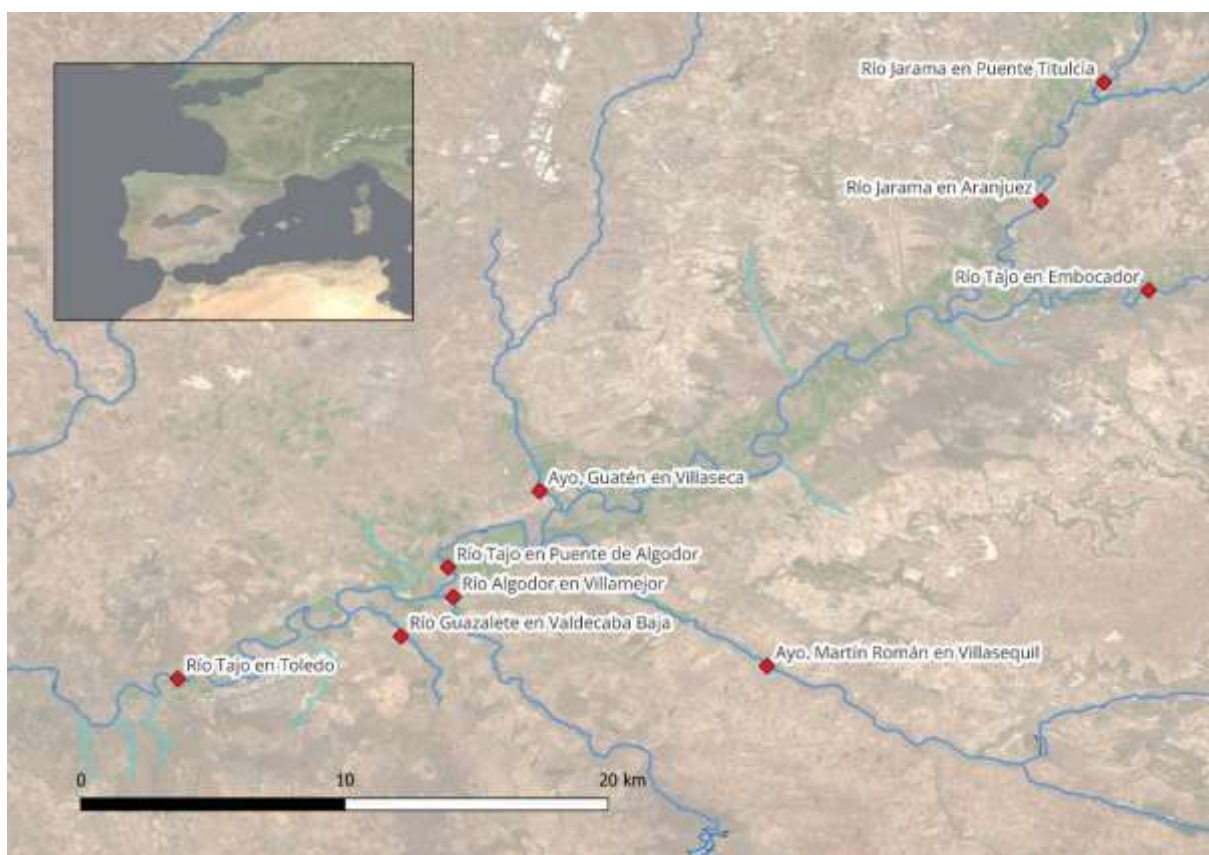
*Con presencia de faltas.

Con el objeto de conocer la proporción de vertidos que soporta el río, estos han sido relacionados con los caudales circulantes. Para ello, han sido considerados los vertidos autorizados al dominio público hidráulico del Censo de Vertidos de la demarcación hidrológica del Tajo (CHT, 2021) elaborado según el artículo 254 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico (BOE, 1986). Se han recogido los datos de las subcuencas receptoras hasta la última estación de control de calidad del agua (Toledo 2-Tajo, véase Figura 5) en la capital toledana, así como los producidos directamente al propio río. En este cálculo se han obviado los autorizados generados aguas arriba de la derivación del trasvase Tajo-Segura (en la presa de Bolarque), ya que, en función de los caudales trasvasados, el volumen de vertidos en el río Tajo podría estar distorsionada. Además, suponen tan solo el 5 % del caudal circulante, lo cual puede considerarse como un volumen despreciable. Hay que tener en cuenta que los vertidos realizados en cada uno de los casos no tienen por qué coincidir con el volumen autorizado, pero, en la práctica, ambos valores (reales y máximo autorizado) se encuentran muy ajustados, por lo que sí que pueden ayudar a tener una idea de su proporción respecto al caudal circulante. Los vertidos autorizados pueden, por tanto, considerarse como el máximo al que podrían llegar los vertidos realizados, siendo ambos valores muy próximos. Por otro lado, no han podido ser contabilizados los vertidos no autorizados, por razones obvias de ausencia de información, si bien este hecho no parece importante por la escasa relevancia que tienen estos vertidos respecto del total, según ha sido comunicado por la CHT.

Para conocer la proporción que representan los vertidos diluidos en el caudal circulante del río Tajo, se han calculado los caudales medios en las estaciones de la red de aforos de la CHT (CEDEX, 2019; véase en la Figura 5 su localización) en el tramo entre Aranjuez y Toledo. En total, son 9 estaciones de control de caudales. En lo que respecta a la serie temporal, se han utilizado los datos desde 1999 hasta 2020 (último año con datos disponibles al cierre de esta investigación). Se ha trabajado con esta serie de los últimos 20 años para minimizar

distorsiones por los efectos del cambio climático en la reducción de los caudales de los ríos de la cuenca. A la hora de estudiar los caudales circulantes, hay que tener en cuenta que la estación de aforos más cercana a Safont (en Toledo ciudad) es la de Puente de Algodor, a 25 km de Safont aguas arriba. La estación de Safont fue cerrada en el año 2009. En principio, esta circunstancia no supone demasiado inconveniente, teniendo en cuenta que desde el Puente de Algodor, al Tajo las entradas de agua son mínimas (0,48 m³/s de media desde el río Algodor y 0,06 m³/s desde el río Guazalete). Existen otros arroyos de menor entidad, pero sin estación de aforos.

Figura 5. Estaciones de aforos en la zona de estudio.

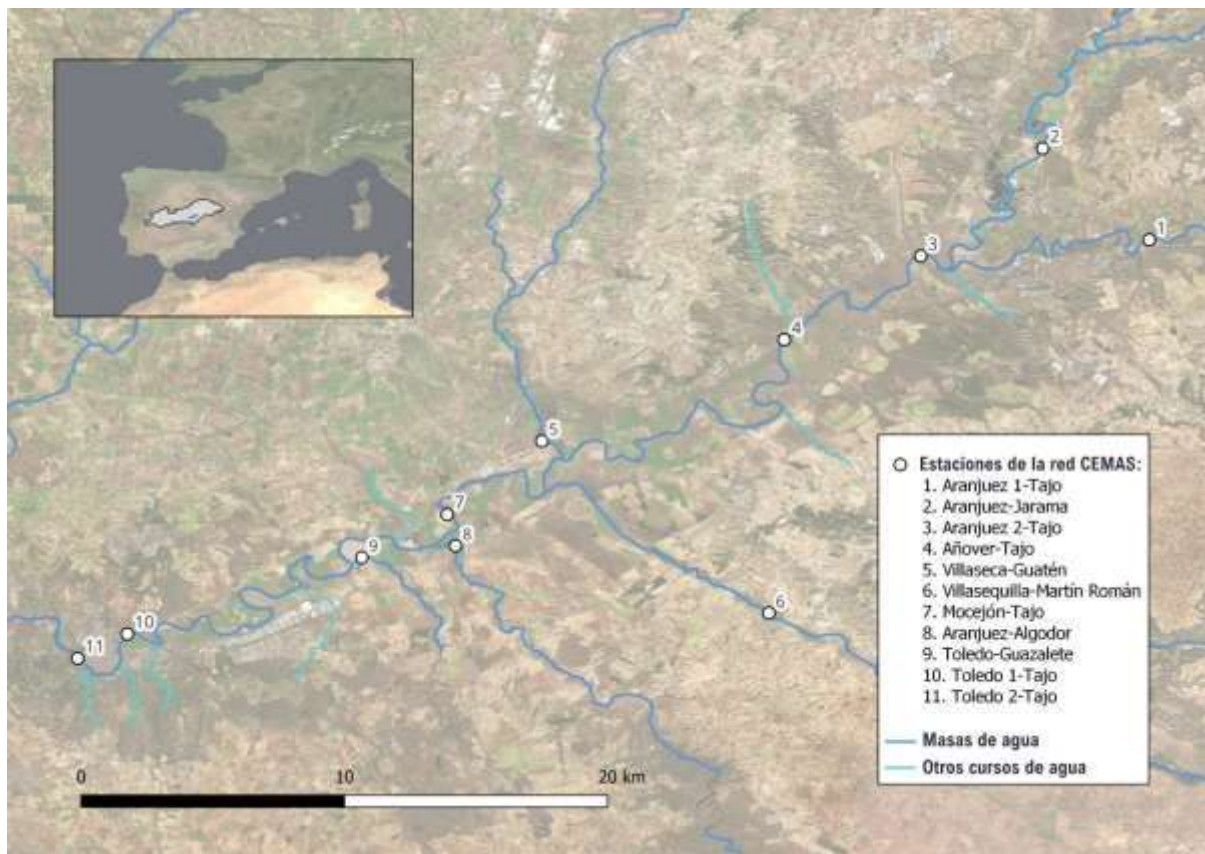


Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos del CEDEX (2019).

En cuanto a las características fisicoquímicas, que incluye los nutrientes, se ha realizado un análisis estadístico espaciotemporal: espacial, en el tramo de río Tajo desde el Embalse de Bolarque hasta Toledo y en el río Jarama; y temporal utilizando las máximas series históricas de cada una de las variables fisicoquímicas disponibles. Los datos han sido obtenidos de las redes del programa de seguimiento de calidad de las masas de agua superficiales de la CHT: Red CEMAS (CHT, 2022a) y Red SAICA (CHT, 2022b). Los programas de seguimiento de las masas de agua sirven para evaluar el cumplimiento de los objetivos medioambientales emanados por la Directiva 2000/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (DMA, 2000).

Los parámetros estudiados de la Red CEMAS (Figura 6) han sido las concentraciones de nutrientes (nitratos —mg de NO_3/l —, fosfatos —mg de PO_4/l — y amonio —mg de NH_4/l) y sulfonato de alquilbenceno lineal (mg de LAS/l), único tensoactivo medido. En esta red de estaciones de control, las medidas se realizan en momentos puntuales de cada año, sin periodicidad fija. Se ha analizado la máxima serie histórica disponible (2016-2020). En esta serie solo se analiza el sulfonato de alquilbenceno lineal en 2020 en la zona de estudio. Los datos no son homogéneos en cada estación en cuanto a número de muestras anuales (varían entre 1 a 12), número de muestreos entre las estaciones (variación entre 14-27 observaciones) y fecha de la recogida de datos.

Figura 6. Estaciones de la Red CEMAS en la zona de estudio.

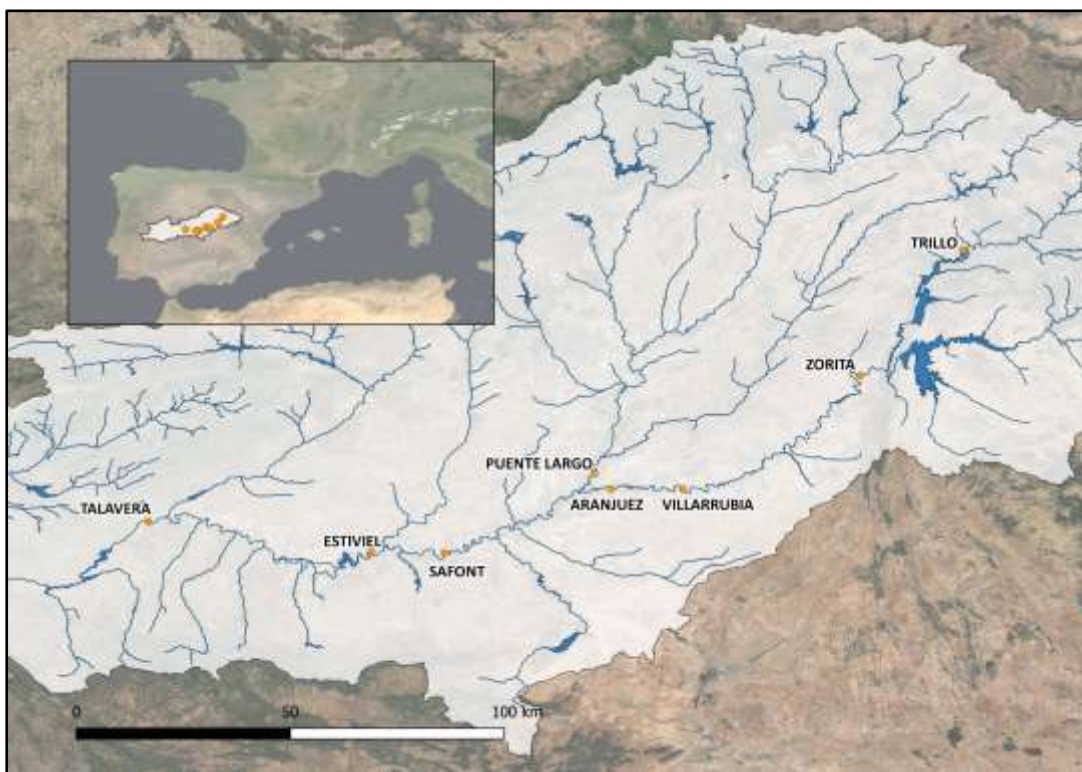


Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de CHT (2022a).

A través de los datos de la red CEMAS se tiene una idea del grado de contaminación general de las masas de agua en cada uno de los puntos con información disponible. Pero esta base de datos, si bien es útil para disponer de una visión general del estado del río, resulta insuficiente para el objetivo último de esta investigación debido a su escasa periodicidad e irregularidad entre estaciones. Por ello, para llevar a cabo una comparativa en continuo de las características fisicoquímicas del agua procedente del Jarama y de la que circula en el Tajo a su paso por Toledo se ha recurrido al análisis de los datos quinceminutales de la Red SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas, CHT, 2022b). Sus estaciones proporcionan un control continuo y sistemático de los niveles de calidad de las aguas, mediante

la medición de parámetros en tiempo real (quinceminutal) y toma de muestras automática. Téngase en cuenta, a la hora de interpretar los resultados, que la red SAICA ha sido diseñada para controlar los vertidos, situándose las estaciones de muestreo en zonas cercanas a fuentes contaminantes, por lo que es posible que los resultados de contaminación que se aportan estén sesgados por ubicación. Se han utilizado los datos de los años completos 2014 a 2021 de 8 estaciones (véase en la Figura 7 su localización y en la Tabla 2 la información disponible en cada una). Esta comparativa, en concreto, ha sido realizada a partir de las estaciones de Puente Largo (E5), en el río Jarama en Aranjuez, y Safont (E6), en el Tajo en Toledo, y permite observar la influencia de la contaminación del río Jarama, procedente de la región de Madrid, sobre el río Tajo. De cada uno de los parámetros fisicoquímicos ha sido calculada la mediana, estimador más robusto que la media aritmética ante la presencia de datos anómalos, como es el caso que nos ocupa en esta investigación. El contraste de comparación entre medianas se ha resuelto utilizando técnicas de simulación. En concreto, los p-valores se han obtenido mediante técnicas de bootstrap a partir de 1000 remuestras (Efron and Tibshirani, 1994). No obstante, el gran tamaño muestral disponible (datos quinceminutales durante 8 años) llevará a rechazar la hipótesis nula de igualdad de medianas en todos los casos, ya que cualquier pequeña diferencia es detectada. Por ello, las diferencias entre medianas no podrán ser valoradas desde su significatividad estadística, sino desde el punto de vista de su diferencia sustantiva, i.e., de si para cada parámetro concreto, esas diferencias detectadas suponen un claro incremento o decremento que tenga alguna implicación o no.

Figura 7. Estaciones de la Red SAICA utilizadas en el estudio.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de CHT (2022b).



Los datos de la Red SAICA, debido a su carácter quinceminutal, han sido utilizados también para analizar si durante los episodios de espumas han concurrido circunstancias anómalas de contaminación o cualquier otra condición física. A pesar de la potencialidad de los datos aportados por esta Red SAICA, esta no ha podido ser utilizada para el estudio de la contaminación aguas arriba de Toledo debido a la falta de datos en la estación del Tajo en Aranjuez E4, en Madrid.

Los parámetros medidos en las estaciones de la red SAICA son: temperatura ($^{\circ}$ C), pH, conductividad (μ S/cm), oxígeno (mg/l), turbidez (NTU), amonio (mg/l), fosfatos (mg/l) y nitratos (mg/l). Estos factores han sido tenidos en cuenta por la información que aportan por sí mismos y por poder ser indicadores indirectos de la presencia de las sustancias que pueden dar explicación a las espumas, los tensoactivos. La presencia de altas concentraciones de amonio en el medio fluvial se relaciona con la presencia de aguas residuales urbanas, de residuos humanos que conllevan, a su vez, la presencia de geles y detergentes con tensoactivos. En general, las concentraciones de tensoactivos en aguas residuales pueden oscilar entre 1-20 mg/l, y en aguas superficiales en torno a 0,5 mg/l, detectándose la formación de espumas a partir de 0,3 mg/l (Ríos, 2014). Esto implica que las aguas residuales presentan concentraciones de tensoactivos suficientes para formar espumas. Por su parte, los fosfatos, también presentes en las aguas residuales urbanas e industriales, siguen presentes en muchos de los detergentes con tensoactivos aún hoy, a pesar de que a partir de 2013 se limitó su uso en detergentes para ropa y a partir de 2017 en detergentes para lavavajillas (DOUE, 2004). Se entiende que, a mayor concentración de amonio y de fosfatos, mayor concentración de tensoactivos y, por tanto, mayor posibilidad de presencia de espumas en el río. En la Tabla 2 se presentan los datos disponibles para cada parámetro en cada estación, destacando la ausencia de datos de amonio y fosfatos en muchas de las estaciones. En cuanto a los nitratos, solo existen datos para la estación de Safont, por lo que no puede hacerse un estudio de su evolución entre los distintos puntos de control.

Tabla 2. Parámetros consignados en cada estación de muestreo de la Red SAICA.

Provincia	Estación							
	Guadalajara			Madrid		Toledo		
Parámetro	E1 Trillo	E2 Zorita	E3 Villarrubia	E4 Aranjuez	E5 Puente Largo	E6 Safont	E7 Estiviel	E8 Talavera
Temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Conductividad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oxígeno	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Turbidez	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Amonio	X	X	X	X	✓	✓	✓	X
Fosfatos	X	X	X	X	✓	✓	✓	X
Nitratos	X	X	X	X	X	✓	X	X

Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de CHT (2022b).

Para cada estación se analizaron los datos quinceminutales de los años 2013 a 2022, lo que supuso un total de 280.320 registros de cada parámetro en cada estación. No obstante, debido a que ni el año 2013 ni el 2022 estaban completos, fueron eliminados de la base de datos para evitar conclusiones erróneas. La distribución de datos de cada uno de los componentes en las redes de información disponibles es muy variable, faltando gran cantidad de ellos a lo largo de



días, meses e incluso años completos. Por este motivo, el año 2017 ha sido eliminado completamente en la comparación entre estaciones. Ha sido necesario, además, eliminar todos los datos con valor de 0 para temperatura del agua, pH y conductividad al considerarse que eran debidos a fallos en la medición o en la transcripción de la información. Además, se detectó que algunas series estaban acotadas en sus valores superiores, aunque se desconoce la razón. Es posible que los sensores no consignen valores superiores o que se haya dispuesto un límite para los mismos.

Como referencia para valorar el estado de las aguas en las estaciones SAICA y CEMAS se han tenido en consideración las condiciones de referencia y límites de cambio de estado que aparecen en el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental (BOE, 2015). Cada uno de estos elementos tienen unos límites de cambio diferentes en función del tipo ecológico de masa de agua. En el caso de la estación de E5-Puente Largo, la masa de agua correspondiente, según aparece en el Plan Hidrológico, es la ES030MSPF0416021 *Río Jarama desde Río Tajuña hasta Río Tajo*, cuya tipología es la R-T16 *Ejes mediterráneo-continentales mineralizados*. Mientras que para la estación de Safont es la ES030MSPF0608221 *Río Tajo desde confluencia con Arroyo de Guatén hasta Toledo*, cuyo ecotipo es el R-T17 *Grandes ejes en ambiente mediterráneo*. En la Tabla 3 se muestran los límites de cambio de estado para ambas masas de agua.

Tabla 3. Límites de cambio de estado

Tipo de río	Indicador	Unidades	Límites de cambio de estado	
			Muy bueno/Bueno	Bueno/Moderado
R-T16	pH	–	6,5-8,7	6-9
	Oxígeno	mg/L		5
	% Oxígeno	%	70-100	60-120
	Amonio	mg NH ₄ /L	0,2	0,6
	Fosfatos	mg PO ₄ /L	0,2	0,4
	Nitratos	mg NO ₃ /L	10	25
R-T17	pH	–	6,5-8,7	6-9
	Oxígeno	mg/L		5
	% Oxígeno	%	70-100	60-120
	Amonio	mg NH ₄ /L	0,3	1
	Fosfatos	mg PO ₄ /L	0,2	0,4
	Nitratos	mg NO ₃ /L	10	25

Fuente: BOE (2015)

Los episodios de espumas en el río Tajo a su paso por la ciudad de Toledo han sido obtenidos de la hemeroteca local, siempre que ha sido posible, y del archivo personal cedido para la investigación por Eduardo Sánchez Butragueño, autor del blog Toledo Olvidado (Sánchez, 2022) (véase Tabla 4). En esta investigación se recogen aquellos episodios registrados desde 2016 hasta 2021, con la excepción de 2020, año de aparición y mayor incidencia de la COVID-19, en el que no se ha podido registrar ninguno. Durante este periodo han existido más días con presencia de espumas en el río, que no han podido ser incluidos en esta investigación por



no disponer de la base documental apropiada. Téngase en cuenta que, cuando las espumas en el río Tajo a su paso por Toledo aparecen, pueden (o no) ser noticia, pero los días siguientes seguro ya no lo son. Y cuando se hacen habituales, no son noticiables, la ciudadanía las integra en su día a día, en su paseo por la senda ecológica, con resignación, hasta el punto de que no lo comunica ni deja constancia en redes sociales de este hecho. Durante los años 2022 y 2023, antes del cierre de este trabajo, los episodios de espumas ocurren ya prácticamente todos los días. En consecuencia, ante la imposibilidad de obtener una base de datos que solo contenga las fechas sin espumas, se ha optado por hacer la comparativa entre la base de datos completa de parámetros fisicoquímicos en la estación de Safont y la de los episodios de espumas conocidos.

Tabla 4. Episodios de espumas en Toledo y existencia de datos fisicoquímicos en las estaciones de control de la Red SAICA.

Fecha aparición espumas en el río Tajo a su paso por Toledo		Existencia de datos en Estación SAICA E6-Safont (Toledo)	Referencia
2016	15-oct	✓	Corral, M (16/10/2016)
	30-oct	✓	Muñoz J.V. (31/10/2016)
	01-dic	X	Eduardo Sánchez Butragueño
	05-dic	X	Eduardo Sánchez Butragueño
	09-dic	X	Rodríguez, D. (09/12/2016)
2017	05-ene	X	Eduardo Sánchez Butragueño
	13-feb	X	Eduardo Sánchez Butragueño
	22-jul	✓	Eduardo Sánchez Butragueño
	02-ago	✓	Lasexta.com (02/08/2017)
	20-oct	✓	Enclm (22/10/2017)
	21-oct	✓	Enclm (22/10/2017)
	22-oct	✓	Enclm (22/10/2017)
	06-dic	✓	Romero, D. (06/12/2017)
	07-dic	✓	Eduardo Sánchez Butragueño
	09-dic	✓	Verdugo, J. (09/12/2017)
31-dic	✓	Del Río, C. (31/12/2017)	
2018	15-ene	✓	Martín. A. (18/01/2018)
	21-ene	✓	De Juan, R. (21/01/2018)
	22-ene	✓	Eduardo Sánchez Butragueño
	25-ene	✓	Río Tajo Vivo (25/01/2018)
	08-feb	✓	Arango, R. (08/02/2018)
	03-mar	✓	Río Tajo Vivo (03/03/2018)
	04-mar	✓	Noticias CMM (04/03/2018)
	17-mar	✓	Verdugo, J. (23/03/2018)
	09-jul	✓	LaSexta (09/07/2018)
	08-oct	✓	Eduardo Sánchez Butragueño
	29-nov	✓	Toledodiario (29/11/2018).
	19-dic	✓	Eduardo Sánchez Butragueño
2019	09-feb	✓	Enclm (10/02/2019)
2021	23-feb	✓	Gonzalo Garrigos (23/02/2021)
	24-mar	✓	Toletho (24/03/2021)
	29-abr	✓	Patrimonio Toledo (29/04/2021)
	23-jun	✓	Rafael Camarillo (23/06/2021)
	24-oct	✓	Morlanes, A. (25/10/2021)

Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss



Se ha procedido a realizar contrastes de diferencias de medias (ANOVA) para cada uno de los parámetros en ambas bases de datos, con el fin de conocer si las muestras no provienen de la misma población o debemos seguir suponiendo que sí. De esta manera, si las diferencias de medias son significativamente diferentes de cero, si de la base de datos completa en Safont hubieran podido ser eliminados todos los días con espumas, las medias seguirían siendo significativamente diferentes entre ellas. En caso de no asunción de algunos de los dos supuestos necesarios (normalidad y homocedasticidad), siguiendo a Lix et al. (1996) se ha optado por considerar que la no normalidad no implica riesgo especialmente grande de falso positivo y, en el caso de la homocedasticidad, se han planteado test alternativos como Brown y Forsythe (1974) o Welth (1951). Respecto a la violación del supuesto de independencia se han utilizado muestras aleatorias de las observaciones, también con el objetivo de minimizar problemas de heterocedasticidad (Glass et al., 1972).

Durante estos días de episodios de espumas, para detectar hasta qué punto la contaminación puede provenir del Jarama, tal y como señala la literatura, se estudió el comportamiento de los parámetros también en la estación E5-Puente Largo. A partir de la información sobre la velocidad media de las aguas del Tajo a su paso por Aranjuez (considerada de 0,6278 m/s), y teniendo en cuenta que las diferencias de caudal en los distintos momentos darían lugar a velocidades diferentes, se estimó que las aguas tardan en recorrer los 72,32 km entre Puente Largo y Safont aproximadamente 32 horas, con un intervalo de variación de 6 horas, por lo que, tras analizar cada uno de los casos en detalle, se analizaron los valores en E5-Puente Largo 32 horas (más menos 6 horas) antes del día en el que el episodio de espumas se produjo en Toledo.

Además, se ha comparado la mediana de cada parámetro del día del episodio de espumas con la mediana en el año correspondiente. Para ello, las variables cuantitativas de concentración de amonio y fosfatos, respectivamente, han sido transformadas en caracteres cualitativos, fijando como valor “Muy alto” aquel que supera el tercer cuartil de los datos de la estación a lo largo de toda la serie histórica (25 % de los de mayor concentración). En la Tabla 5 se muestran las categorías establecidas.

Tabla 5. Criterio para el establecimiento de las categorías de la transformación de las observaciones cuantitativas de amonio y fosfatos en carácter cualitativo.

Criterio: concentración mg/l	Categorías
mg/l >Q3	Muy alto
Me < mg/l < Q3	Alto
Q1 < mg/l < Me	Bajo
mg/l < Q1	Muy bajo

Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss

4. Resultados

4.1. Evaluación de vertidos autorizados que soporta el tramo medio del río Tajo

La cuenca del Jarama soporta un volumen de vertidos autorizados al dominio público hidráulico de 589 hm³/año, correspondiendo el 84 % (496 hm³/año) a la comunidad autónoma de Madrid. De ellos, la práctica totalidad provienen de las EDAR, siendo estas responsables del 87 % de



los vertidos autorizados en toda la cuenca del Jarama (Tabla 6). Recuérdese que los vertidos autorizados no tienen por qué ser vertidos reales, si no el máximo al que estos podrían llegar, aunque en la práctica son muy similares.

Tabla 6. Vertidos autorizados en la cuenca del río Jarama

Vertidos autorizados en la cuenca del Jarama	m ³ /año	%
Por provincia de origen del vertido		
Provincia de Guadalajara	91.287.479	15,5
Provincia de Madrid	496.634.889	84,3
Provincia de Toledo	890.000	0,2
Total	588.812.368	100,0
Por fuente de origen del vertido		
Vertidos autorizados totales provenientes de EDAR	514.534.300	87,4*
Vertidos autorizados provenientes de EDAR de la provincia de Madrid	489.073.059	83,1*

Nota: *Porcentaje del total de la cuenca del Jarama.

Fuente: Censo de vertidos autorizados (CHT, 2021). Elaboración propia

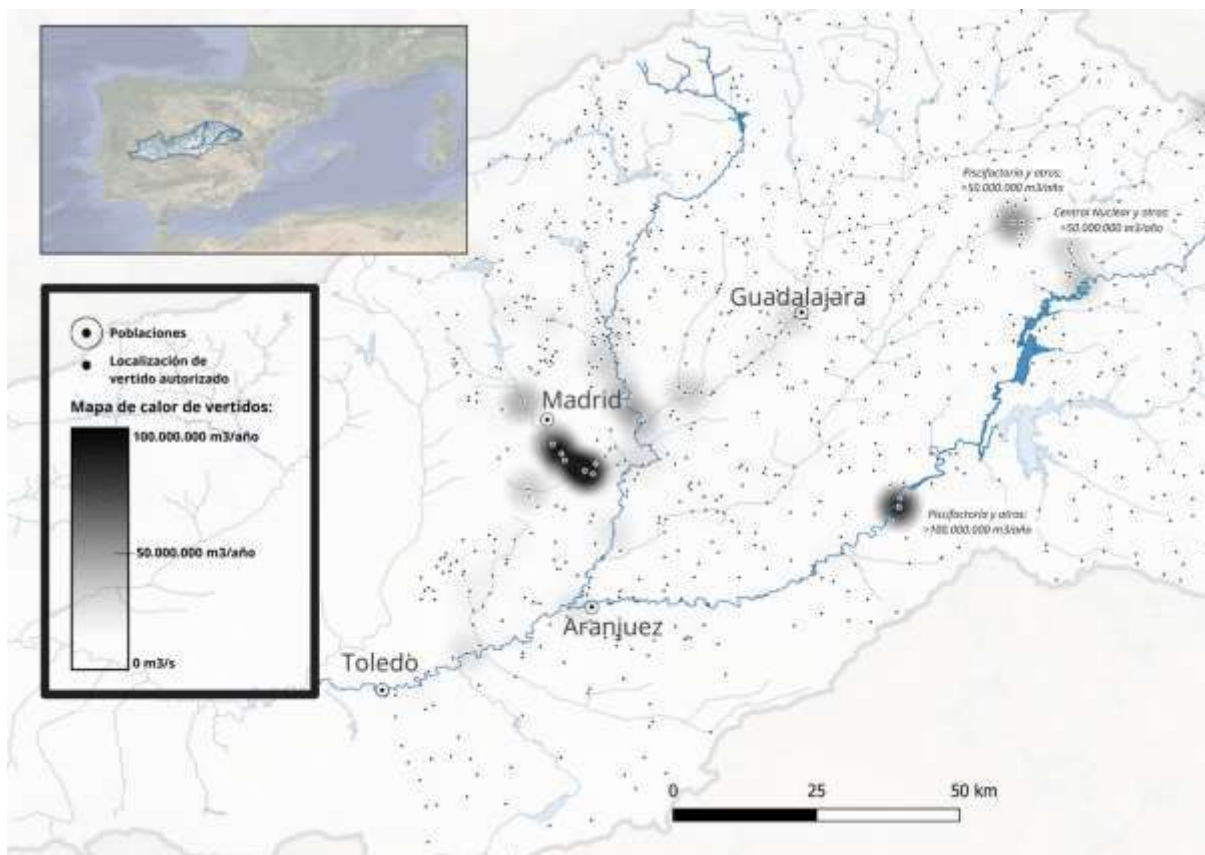
Tabla 7. Vertidos autorizados en la cuenca del río Tajo desde Aranjuez hasta la ciudad de Toledo.

Vertidos autorizados cuenca del Tajo hasta Toledo	m ³ /año	% sobre total vertidos	% sobre total vertidos carga orgánica
Vertidos provenientes del río Tajo en Aranjuez	116.332.266	15,7	
Vertidos autorizados totales "con carga orgánica destacable"	21.724.266	2,9	3,8
De los cuales, de origen urbano o asimilable	12.115.732	1,6	
Vertidos provenientes del río Jarama	588.812.368	79,6	
Vertidos autorizados totales "con carga orgánica destacable"	525.740.368	71,1	92,2
De los cuales, de origen urbano o asimilable	520.862.119	70,4	
Vertidos directos en el río Tajo entre Junta del Jarama y Toledo	15.509.042	2,1	
De los cuales, de origen urbano o asimilable	3.536.322	0,5	0,6
Vertidos por afluentes por la derecha entre la Junta del Jarama y Toledo	15.598.453	2,1	
De los cuales, de origen urbano o asimilable	15.468.428	2,1	2,7
Vertidos por afluentes por la izquierda entre la Junta del Jarama y Toledo	3.458.848	0,5	
De los cuales, de origen urbano o asimilable	3.458.848	0,5	0,6
Total vertidos	739.710.977	100,0	
Total vertidos con carga contaminante destacable	569.928.232		100,0

Fuente: Censo de vertidos autorizados (CHT, 2021). Elaboración propia

Si a esto se le suman los vertidos autorizados en el río Tajo hasta la ciudad de Toledo (Tabla 7), se deduce que la cuenca del río Tajo hasta Toledo soporta un volumen de 739,7 hm³/año. El río Jarama es el principal aporte en el río Tajo hasta la ciudad de Toledo, siendo responsable del 79,6 % de los mismos. De esos 739,7 hm³/año, 569,9 hm³/año son vertidos que se consideran con carga orgánica destacable, ya que su origen no es ni de piscifactoría, ni de central nuclear, ni de estación térmica, entre otros. Si se centra la atención en los vertidos autorizados con carga orgánica destacable, entonces, la responsabilidad del Jarama se eleva hasta el 92,2 % (véase Figura 8). En la Figura 8 puede apreciarse con claridad la magnitud de los vertidos autorizados en Madrid respecto del resto de la cuenca hasta Toledo.

Figura 8. Vertidos autorizados en la cuenca vertiente al río Tajo a su paso por Toledo. Isla de calor realizada a partir del volumen de vertido autorizado anual (m³/s).



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de la información del Censo de Vertidos (CHT, 2021).

La información que nos ofrece la red de estaciones de aforo de la CHT en el tramo de estudio es contundente (véase Tabla 8 y Figura 8): entre un 68 % y un 72 % del agua que circula por el río Tajo en Toledo corresponde a vertidos autorizados, que, recuérdese, se corresponde con el máximo vertido permitido de aguas residuales, parecido al valor real de vertido. Si a estos les descontamos los vertidos industriales que no tienen una carga orgánica destacable (y que por su gran volumen pueden alterar la proporción), tendríamos que por el río Tajo en Toledo discurren entre un 52 % y un 65 % de aguas residuales. Por su parte, el río Jarama lleva un porcentaje de vertidos entre el 71 % y 73 %, mientras que el río Tajo, previo a su junta con el



río Jarama, contiene un 43,5 %. Si se descuentan los vertidos sin carga orgánica destacable, como las piscifactorías, el río Jarama lleva un porcentaje de vertidos con carga orgánica destacable entre el 64 % y 65 %, mientras que el río Tajo, previo a su paso por Aranjuez, contiene, tan solo, un 4 %. Entre el resto de los afluentes en el Tajo medio, hay que destacar que el 100 % del agua que transcurre por sus cursos (arroyo Guatén, arroyo Guazaleta, arroyo Martín Román y río Algodor) son vertidos autorizados, no recibiendo aportaciones considerables de aguas limpias en este tramo. Esto implica una prácticamente nula capacidad del tramo medio del río Tajo de dilución de la contaminación que recibe.

Nos encontramos, por tanto, en casi todos los casos, con ríos sobreexplotados en cuanto a los niveles de vertidos que soportan. Además, hay que considerar el carácter mediterráneo de su régimen de caudales con unos fuertes estiajes, que hacen que en los meses de verano el porcentaje de vertidos sea considerablemente mayor en proporción, ya que las aportaciones naturales disminuyen mientras los vertidos tienen un régimen con pocas variaciones.

Tabla 8. Relación de caudales medios y vertidos autorizados en el tramo medio del río Tajo.

Estación	Caudal medio anual (m ³ /s)	Vertidos autorizados (m ³ /año) ***	% Vertidos autorizados sobre total	Vertidos autorizados con carga orgánica considerable (m ³ /año)*****	% Vertidos autorizados con carga orgánica considerable (%)*****
3258: Río Tajo en Embocador **	7,63	104.720.422 (3,32 m ³ /s)	43,55	110.112.422 (0,32 m ³ /s)	4,20
3174: Río Jarama en Puente Titulcia**	22,28	518.506.212 (16,44 m ³ /s)	73,80	455.434.212 (14,44 m ³ /s)	64,82
3175: Río Jarama en Aranjuez (Puente Largo) *	26,18	587.955.654 (18,64 m ³ /s)	71,21	524.883.654 (16,64 m ³ /s)	63,57
3014: Río Tajo en Puente Algodor **	34,11	732.295.675 (23,22 m ³ /s)	68,08	562.642.955 (17,84 m ³ /s)	52,31
3904: Río Tajo en Toledo*	32,41	739.057.846 (23,44 m ³ /s)	72,31	664.013.061 (21,06 m ³ /s)	64,97
3230: Río Algodor en Villamejor ****	0,044	1.384.814 (0,04 m ³ /s)	100,00	1.384.814 (0,04 m ³ /s)	100,00
3164: Arroyo Martín Román en Villasequilla de Yepes *****	0,016	496.473 (0,02 m ³ /s)	100,00	496.473 (0,02 m ³ /s)	100,00
3233: Río Guazaleta en Valdecaba Baja *****	0,009	275.966 (0,01 m ³ /s)	100,00	275.966 (0,01 m ³ /s)	100,00
3232: Arroyo Guatén en Villaseca ****	0,4	12.465.548 (0,40 m ³ /s)	100,00	12.465.548 (0,40 m ³ /s)	100,00

*solo hay datos hasta 2009

** datos desde 2009 a 2019

***datos 2021

****caudales medios de los últimos 21 años disponibles: Algodor, Guazaleta y Guatén (1999-2019); caudal medio de los últimos 20 años disponibles: San Martín Román (2000-2019)

***** vertidos urbanos más aquéllos industriales con carga orgánica (se exceptúan vertidos de piscifactoría, refrigeración y de industria térmica)

Fuente: Censo de Vertidos (CHT, 2021) y CEDEX (2020). Elaboración propia.



4.2. Análisis espaciotemporal de contaminantes en el tramo medio del río Tajo a través de la Red CEMAS

4.2.1 Concentración de nutrientes en el tramo medio del río Tajo

Con el objetivo de conocer el estado de calidad fisicoquímica del tramo medio del río Tajo, se han analizado los datos de nitratos, fosfatos y amonio en las estaciones de control de la red CEMAS. Se han recogido los datos de las seis estaciones situadas en el río Tajo entre Aranjuez y Toledo (Figura 6), junto con las cuatro existentes en afluentes en este tramo. Los resultados se presentan desde Aranjuez a Toledo. Estos datos se relacionan con las condiciones de referencia y límites de cambio de clase de estado establecidas en la legislación española (BOE, 2015) para dar cumplimiento a los objetivos medioambientales (OMA) de la Directiva Marco del Agua.

La estación de **Aranjuez-Tajo I**, que recoge las aportaciones de la cabecera de la cuenca, muestra unas concentraciones bajas de los tres parámetros respecto a los niveles de referencia (Figura 9). A pesar del alto volumen de vertidos autorizados (43,5 %) no se aprecia una incidencia en la calidad del agua ya que los vertidos con carga contaminante sólo representan un 4,2 % del caudal medio circulante. Hay que señalar que esta estación es previa a los principales vertidos de Aranjuez (EDAR y una industria farmacéutica).

Figura 9. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez 1-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.

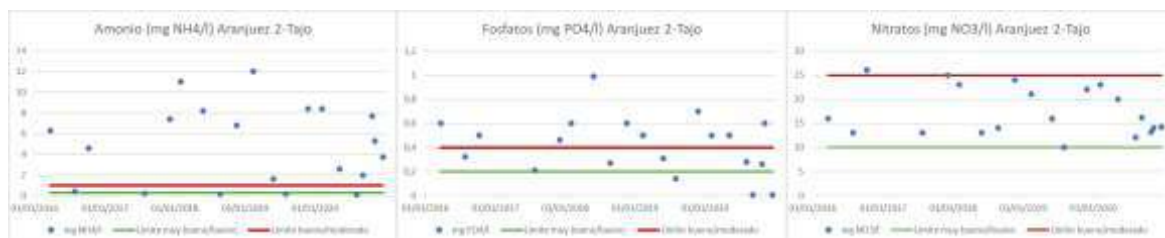


Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a)

A trece kilómetros de esta, aguas abajo, se sitúa la estación **Aranjuez 2-Tajo** y, como puede apreciarse en la Figura 10, la situación es ya muy diferente, observándose una concentración de nutrientes muy superior, con valores por encima de las concentraciones máximas permitidas, sobre todo en fosfatos y en amonio. La explicación se encuentra por la confluencia del río Jarama con el río Tajo y el alto porcentaje de vertidos que llevan las aguas del Jarama (71,21 %), siendo los vertidos autorizados con carga contaminante considerable un 63,3 %. Las concentraciones de nutrientes del río Jarama (estación **Aranjuez-Jarama**) pueden observarse en la Figura 11, con valores que incumplen ampliamente los objetivos medioambientales para cada uno de estos parámetros.



Figura 10. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez 2-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Figura 11. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez-Jarama y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

La siguiente estación de control en el río Tajo es la de **Añover-Tajo**, situada a 8,7 kilómetros aguas abajo de Aranjuez 2-Tajo. En este punto se observa que siguen existiendo valores de concentración de fosfatos y amonio más elevados de lo permitido (Figura 12). En este tramo, el río Tajo recibe vertidos provenientes del arroyo Borox (1,3 hm³/año), el cual carece de estación de control de calidad.

Figura 12. Concentración de nutrientes en la estación Añover-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

A unos 28 kilómetros aguas abajo del río Tajo, se encuentra la estación **Mocejón-Tajo**. La mayor parte de los controles siguen dando niveles por muy por encima de lo permitido de fosfato y amonio (Figura 13). En cuanto a los nitratos, en este punto se alcanzan algunos valores superiores a los objetivos medioambientales, observándose un claro incremento respecto a la estación anterior, con valores similares a los del Jarama. En el tramo comprendido entre las estaciones de Añover-Tajo y Mocejón-Tajo se recoge un volumen de vertido autorizado de 13,86 hm³/año proveniente de los arroyos Gonzalo, Guatén y Martín Román, así como de vertidos directos al río Tajo en este tramo (las cifras antes de la agregación pueden consultarse en la Figura 21). En el arroyo Guatén se encuentra la estación de control Guatén-



Villaseca, con unas concentraciones de fosfatos y amonio muy superiores de las que lleva el río Tajo (Figura 14). Relevante resulta la mala calidad de las aguas de la zona de la Sagra, en los arroyos de la margen derecha del río Tajo, si bien representan un 2,1 % del total de los vertidos hasta Toledo. Asimismo, en el arroyo Martín Román se sitúa la estación de Martín Román-Villasequilla, la cual muestra concentraciones de nitratos mayoritariamente superiores a lo permitido, estando los fosfatos y amonio dentro de los límites legales (Figura 15). Finalmente, la estación de Guazalet-Tajo solo ofrece datos de dos días en abril y mayo de 2020, por lo que no pueden extraerse conclusiones sobre el grado de afección de este curso (Figura 16).

Figura 13. Concentración de nutrientes en la estación Mocejón-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Figura 14. Concentración de nutrientes en la estación Villaseca-Guatén y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Figura 15. Concentración de nutrientes en la estación Villasequilla-Martín Román y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).



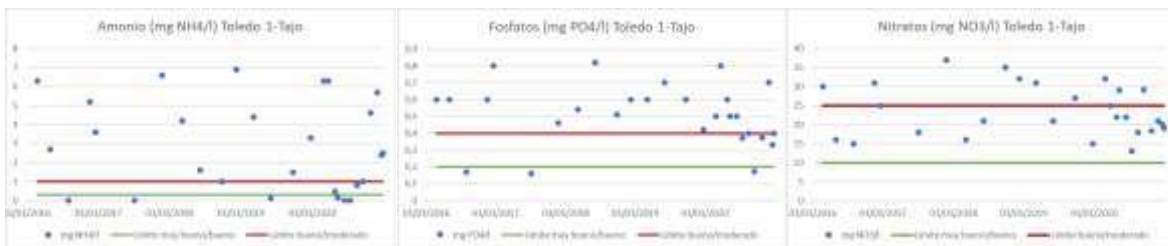
Figura 16. Concentración de nutrientes en la estación Toledo-Guazaleta y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

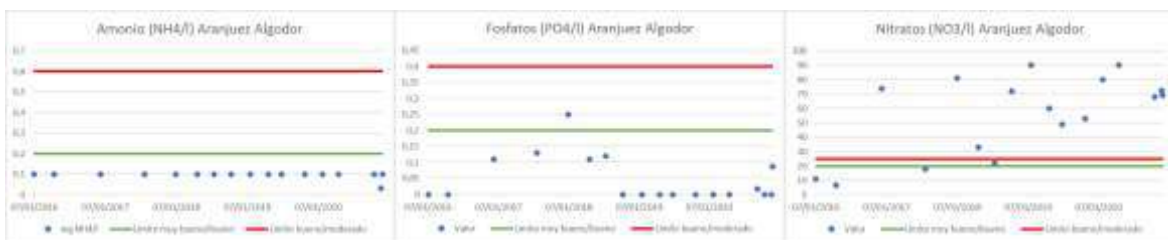
La siguiente estación de control del río Tajo, ya en Toledo (**Toledo 1-Tajo**) se encuentra pasado el barrio toledano de Santa María de Benquerencia, a las puertas del casco histórico de Toledo. Este barrio es actualmente el principal núcleo de población de la capital y cuenta con un importante polígono industrial. La EDAR de Santa María de Benquerencia tiene un volumen de vertido autorizado anual de 2,75 hm³ directo al Tajo. La Figura 17 muestra en este punto, ya dentro del municipio de Toledo, unas concentraciones de fosfatos y amonio superiores a los límites de las normas de calidad ambiental en la mayor parte de los días con mediciones. En cuanto a los nitratos estos valores se sitúan fuera del rango legal del buen estado en el 44 % de las muestras. Además, en este tramo, se reciben vertidos de los arroyos de Algodor, Ramabujas, Los Pucheros y La Rosa (4,53 hm³/año de vertidos en total). La única estación de control en estos afluentes es la de Aranjuez-Algodor, situada en el arroyo Algodor poco antes de su unión al río Tajo. Presenta unas altas concentraciones de nitratos, pero con los valores de amonio y fosfatos dentro de lo permitido (Figura 18).

Figura 17. Concentración de nutrientes en la estación Toledo 1-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Figura 18. Concentración de nutrientes en la estación Aranjuez-Algodor y cumplimiento de objetivos medioambientales.

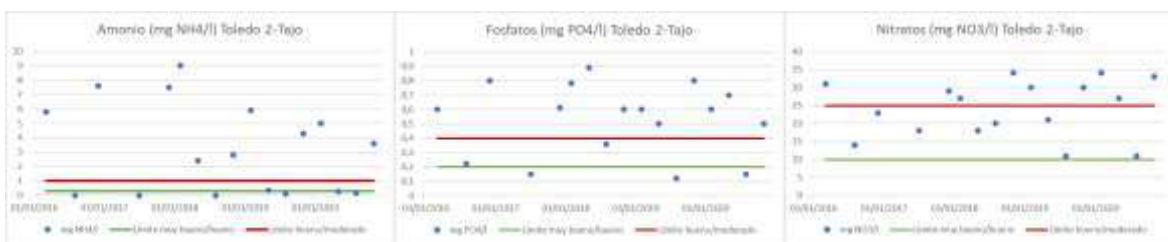


Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).



La última estación de control se sitúa pasado el casco histórico de Toledo (estación Toledo 2-Tajo). En la Figura 19 se observa una tendencia muy similar a la de las anteriores estaciones en el río Tajo, con la mitad de los días con mediciones altas de nitratos (muy superiores al límite de concentración permitido) y con los fosfatos y amonio con concentraciones muy considerables. En el tramo comprendido por las dos estaciones toledanas se da un volumen de vertido autorizado de 0,1 hm³/año, con su origen en los arroyos de La Degollada y La Cañada, si bien se tienen detectados 10 puntos de vertido no autorizado directos al río Tajo en el municipio de Toledo (Cátedra del Tajo UCLM-Soliss, 2023).

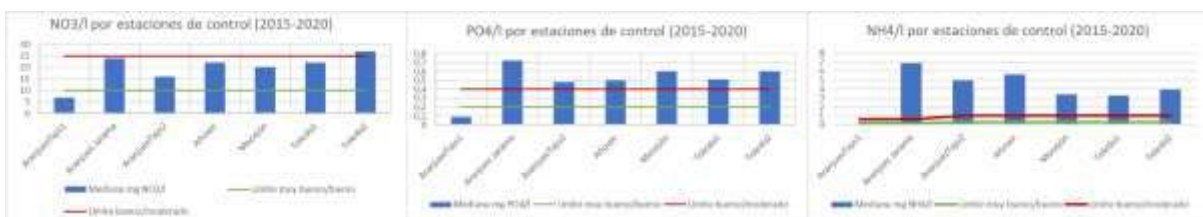
Figura 1920. Concentración de nutrientes en la estación Toledo 2-Tajo y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Analizando la mediana de las mediciones de los años 2016 a 2020 en cada una de las estaciones del río Tajo (incluyendo la estación Aranjuez-Jarama) se aprecia una manera más clara la concentración de nutrientes que soporta el río (Figura 20). Se observa un aumento paulatino de las concentraciones de nitratos a medida que nos acercamos a la ciudad de Toledo, llegando en la estación Toledo 2-Tajo a superar la mediana el nivel de concentración permitido, lo que indica que la mitad de los días medidos se sufre una concentración de nitratos en el agua del Tajo a su paso por Toledo superior al valor máximo permitido. Las medianas de las concentraciones de fosfatos desde la confluencia del río Jarama con el río Tajo son superiores a la máxima concentración permitida (entre un 25 y un 50 % más), indicando que la mitad de los días medidos se ha estado muy por encima del límite legal. El amonio también muestra unos niveles muy altos mantenidos desde el mismo punto, superándose la mitad de los días entre 3 a 5 veces el límite legal.

Figura 20. Medianas de mg de nitratos (NO₃/l), fosfatos (PO₄/l) y amonio (NH₄/l) en las estaciones CEMAS del tramo medio del río Tajo (años 2016-2020) y cumplimiento de objetivos medioambientales.



Fuente: Cátedra del Tajo UCLM-Soliss a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

En definitiva, el tramo medio del río Tajo soporta unas concentraciones de nutrientes que superan los límites permitidos desde la incorporación del río Jarama, siendo esta la principal



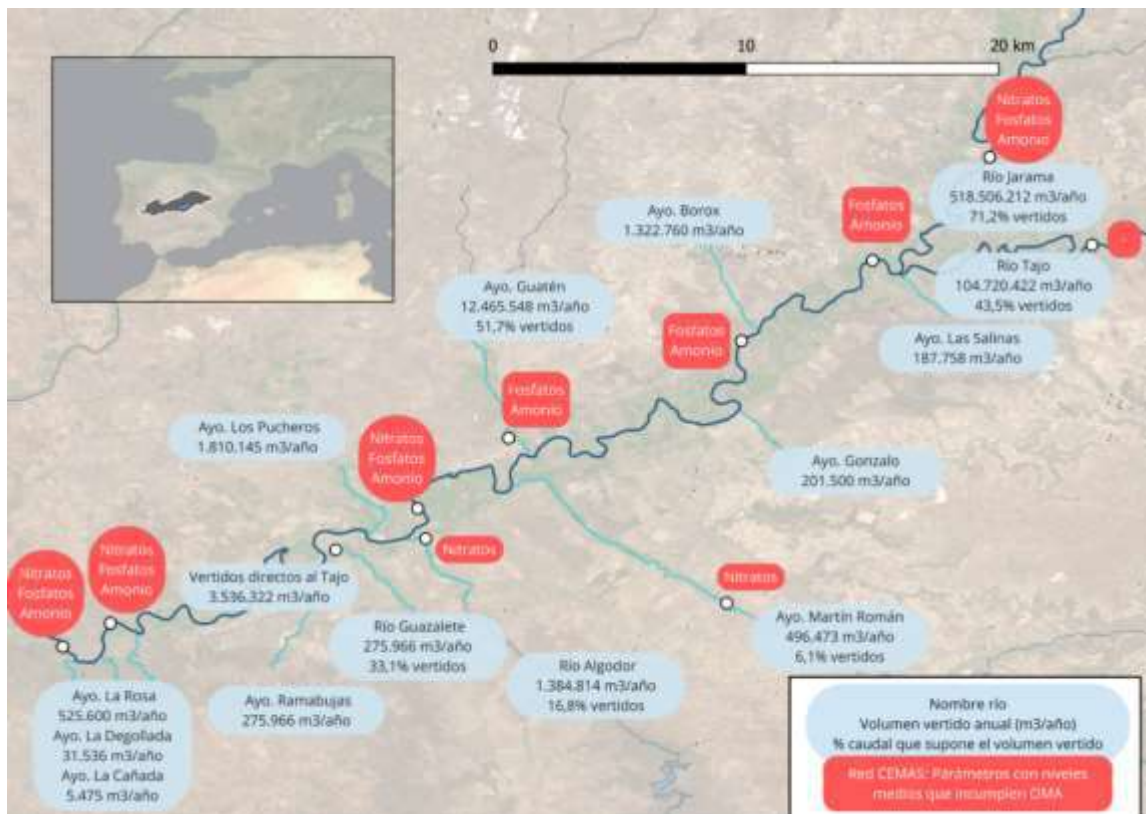
fuente de contaminación por nutrientes (a excepción de los nitratos, cuya concentración aumenta).

Se observa también que el río Tajo, antes de su confluencia con el Jarama, pese al alto porcentaje de vertidos (el 43,5 % de su caudal medio proviene de vertidos autorizados), no afecta al cumplimiento de los objetivos medioambientales de los valores fisicoquímicos, ya que sólo el 4,2 % son vertidos con carga orgánica considerable. Hay que indicar, además, el efecto positivo en la concentración de nutrientes de la dilución de las aguas del río Jarama en las aguas del río Tajo procedentes de Aranjuez. No obstante, tras la incorporación del Jarama, el río Tajo en su tramo medio mantiene las concentraciones de amonio y fosfatos en niveles altos de forma constante por encima de los niveles permitidos. Un elemento que no ha podido ser analizado a partir de los datos disponibles es la incidencia de la contaminación difusa en las concentraciones ascendentes de nitratos.

Respecto a la contaminación difusa debida a las actividades agropecuarias, la Confederación Hidrográfica del Tajo indica que el mal estado de la mayor parte de las aguas afectadas por nitratos “no es directamente achacable a las mismas, sino que es más probable que sean resultado de la interacción de presiones procedentes de diferentes fuentes” (CHT, 2020).

En la Figura 21 se aprecia el impacto que las distintas fuentes de contaminación tienen sobre el río Tajo en su tramo medio.

Figura 21. Vertidos totales autorizados al año en el tramo medio del río Tajo. Se incluye la aportación inicial del Jarama y del propio Tajo antes de la desembocadura.



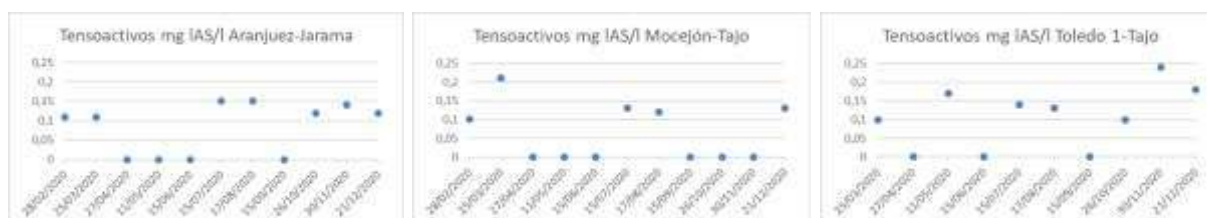
Fuente: Cátedra del Tajo a partir de los datos del Censo de Vertidos (CHT, 2021)



4.2.2. Concentraciones del tensoactivo sulfonato de alquilbenceno lineal en el tramo medio del río Tajo

Como se ha indicado, la red CEMAS solo recoge la presencia de tensoactivos en la zona de estudio en 2020, estando esta limitada a sulfonato de alquilbenceno lineal (LAS). En el ámbito, solo hay datos en las estaciones de Aranjuez 1-Tajo, Aranjuez-Jarama, Mocejón-Tajo y Toledo 1-Tajo. Para la primera estación no hay presencia significativa de LAS (todos los registros son menores de 0,1 mg/l). Los resultados en el resto de las estaciones se muestran en la Figura 22.

Figura 22. Concentración de sulfonato de alquilbenceno lineal (mg/l) en las estaciones de la Red CEMAS de Aranjuez-Jarama, Mocejón-Tajo y Toledo 1-Tajo.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red CEMAS (CHT, 2022a).

Dada la ausencia de datos de otros tensoactivos, así como de una serie espaciotemporal más amplia, no es posible realizar un análisis de los datos sin peligro de caer en errores.

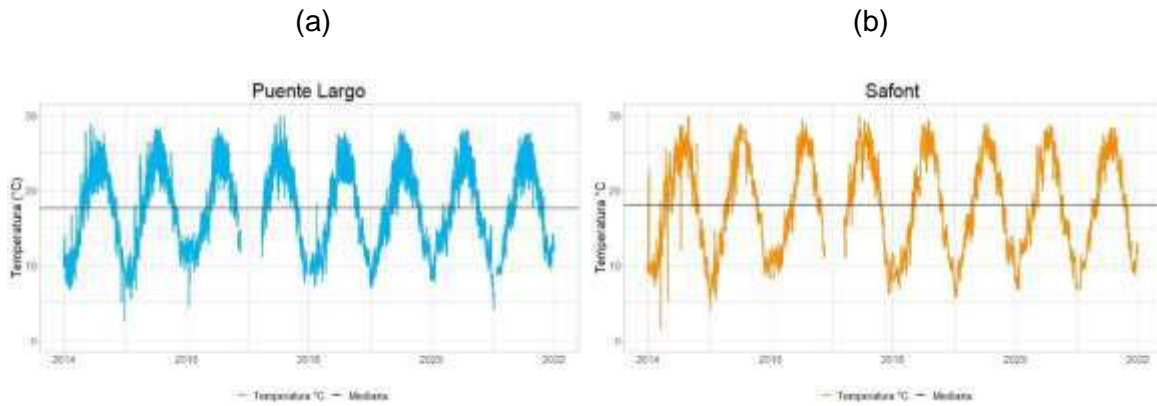
4.3. Análisis temporal de parámetros fisicoquímicos en las estaciones de Safont (río Tajo en Toledo) y Puente Largo (río Jarama en Aranjuez). Comparativa en el periodo 2013-2022

Con el fin de tener un análisis más detallado del origen de la contaminación del río Tajo en Toledo se recurre a los datos quinceminutales de la serie larga de la Red SAICA (CHT, 2022b) desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de diciembre de 2021, años completos disponibles, excepto el 2017 que ha sido eliminado completo por estar disponibles los datos solo desde el mes de enero al mes de abril. En esta sección se analiza comparativamente la serie de datos de temperatura, pH, conductividad, oxígeno, además de amonio, fosfatos y nitratos en las estaciones que, a la vista de estudio anterior con datos de la Red CEMAS (2022a), se han considerado clave: Puente Largo, en el río Jarama antes de la desembocadura en el Tajo, y Safont, en el río Tajo a su paso por el municipio de Toledo. Para cada parámetro se representan sus valores quinceminutales y la mediana correspondiente (aquel valor tal que la mitad de los datos son menores que él y la otra mitad, mayores).

Comenzando por la temperatura del agua, en la Figura 23 se observa la variación temporal normal de las temperaturas a lo largo de las estaciones del año, con máximos en los meses de verano y mínimas en invierno, como corresponde a un clima mediterráneo. Respecto a las temperaturas medianas, no se observan diferencias entre ambas estaciones (Figura 24).

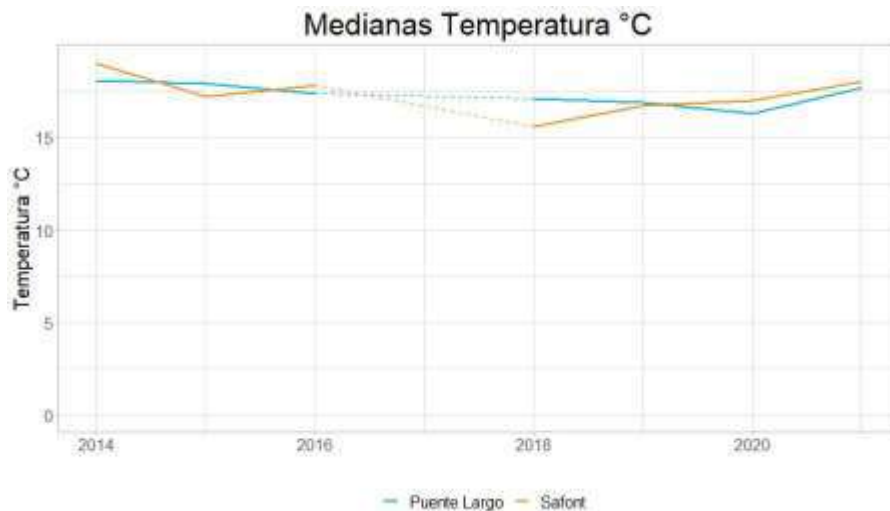


Figura 23. Variación de la temperatura ($^{\circ}$ C) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 24. Comparación de las medianas anuales de la temperatura ($^{\circ}$ C) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021)

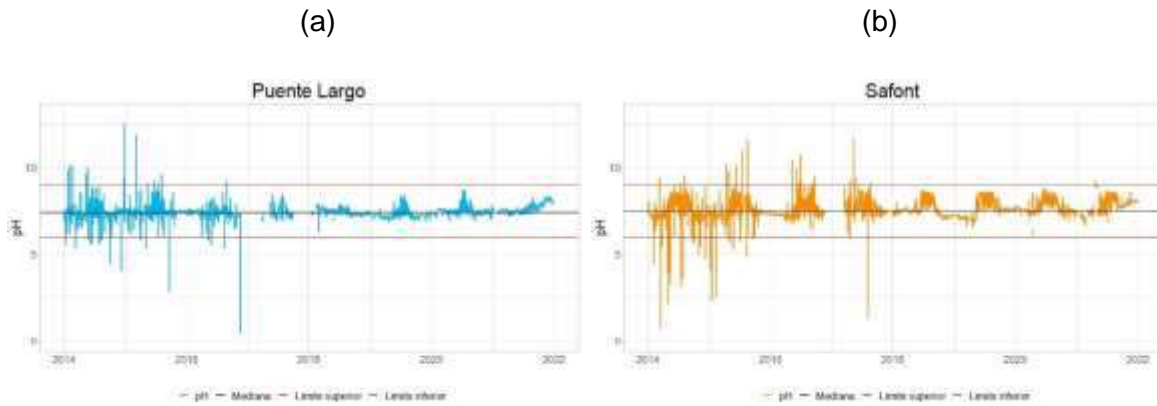


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

En cuanto al pH, se observan grandes fluctuaciones en los datos hasta 2017, que podrían estar relacionados con fallos en la realización de las medidas. A partir de ese año no se observan estos saltos. Los valores son muy similares entre ambas estaciones, siendo el pH, en mediana, ligeramente más alto en la estación de Safont (Figuras 25 y 26).

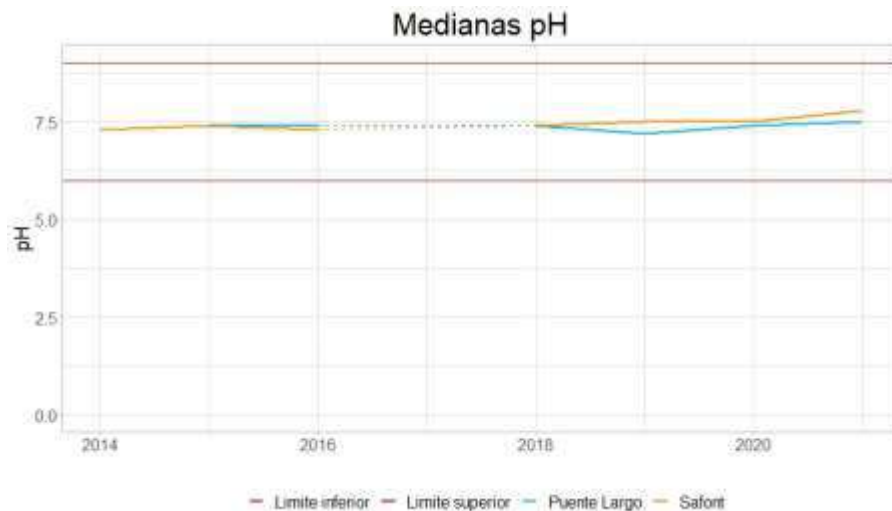


Figura 25. Variación del pH en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 26. Comparación de las medianas de pH en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).



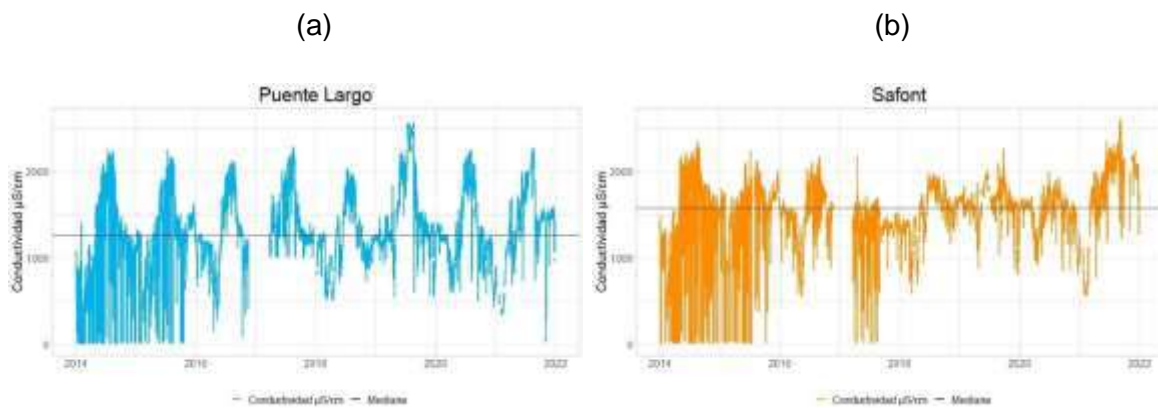
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

La conductividad es un indicador fisicoquímico previsto en la Directiva Marco del Agua pero no utilizado en España debido a que presenta una variabilidad natural muy acusada (MITERD, 2021). Encontramos que los valores en ambas estaciones son frecuentemente muy altos (véanse figuras 27 y 28). Valores tan altos en cuanto a la conductividad pueden ser debidos a concentraciones por iones procedentes de contaminación antrópica, en este caso presumiblemente de amonio, nitratos y fosfatos, o a fuentes naturales por las características geológicas de la cuenca, por disolución de cloruro sódico o por flujo de descarga de agua salada subterránea, procedente del contacto del río con los Montes de Toledo. Debido a estas características de salinidad propias de la zona, la hipótesis más plausible es la suma de ambos motivos.



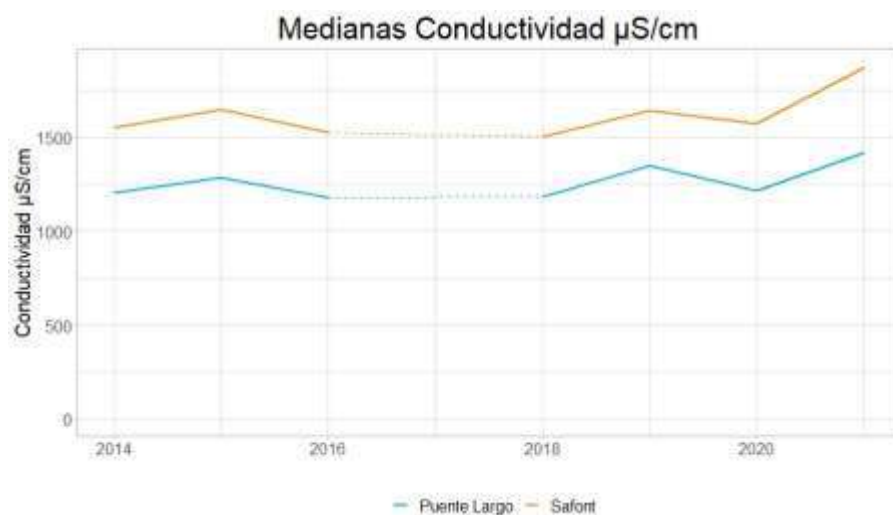
El estudio de las medianas nos muestra que en el río Tajo en Safont se registra un valor mediano de conductividad más alto que en el río Jarama, que puede tener su origen en el flujo de descarga de agua salada citado. No obstante, no se descarta la influencia de la posible presencia de otras fuentes de contaminación en el tramo de río Tajo entre Aranjuez y Toledo que pueden estar afectando a este parámetro en concreto.

Figura 27. Variación de la conductividad ($\mu\text{S/cm}$) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 28. Comparación de las medianas de conductividad ($\mu\text{S/cm}$) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

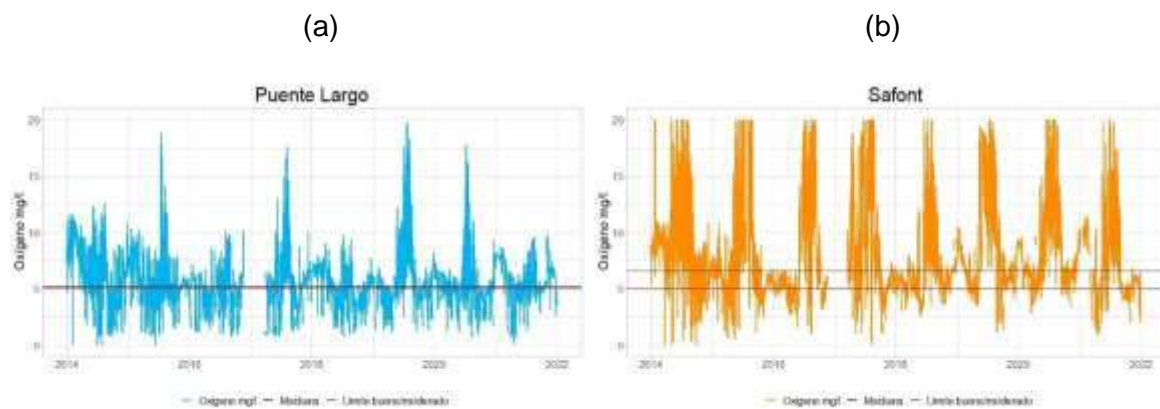
El oxígeno disuelto en agua es un indicador de la capacidad del río para soportar la vida aeróbica, y valores bajos de concentración están asociados a la presencia de materia orgánica. La legislación (BOE, 2015) establece el límite del buen estado en 5 mg/l; por debajo de este valor se considera insuficiente para el ecosistema, resultando por debajo de 3 dañino para la



mayor parte de las especies. En Puente Largo, el 44,8 % de los valores está por debajo del valor de referencia, mientras que en Safont este porcentaje se sitúa en el 20,9 %, porcentajes altos de incumplimiento. Esto indicaría una mayor oxigenación de las aguas en Safont, que puede ser indicativo de una mejor calidad del agua del Tajo en Toledo que la del Jarama en su desembocadura, aunque de aquí no puede deducirse que la primera sea buena. Este resultado es una nueva muestra del mal estado de las aguas que provienen del Jarama, que son capaces de recuperarse parcialmente en su camino hacia Toledo, en parte por procesos de autodepuración e incorporación de flujos menos contaminados (Figura 29).

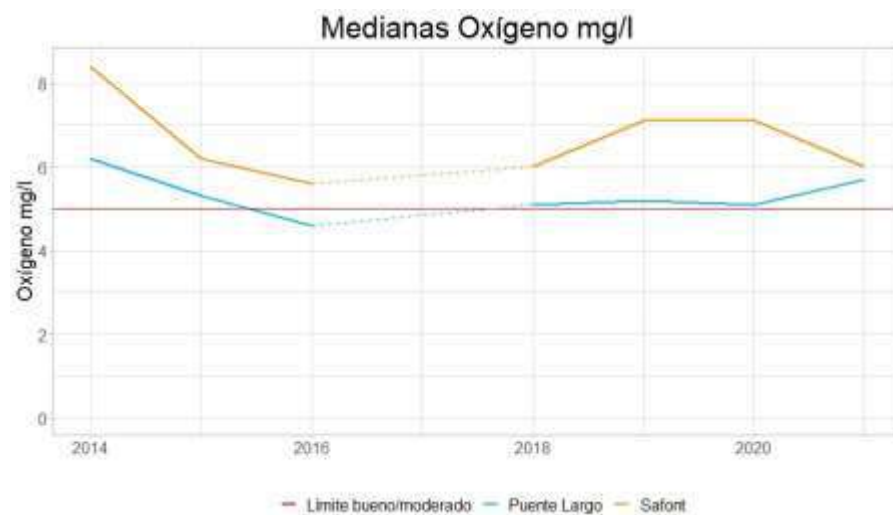
En el estudio de las medianas por año se observa que el oxígeno está por encima de los valores de referencia, especialmente en la estación de Safont. En el año 2016 la mediana de Puente Largo desciende de los 5 mg/l, quedando muy próxima al valor límite (Figura 30).

Figura 29. Variación de oxígeno disuelto (mg/L) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 30. Comparación de las medianas de oxígeno disuelto (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (izquierda) y de Safont (derecha) de la Red SAICA (2014-2021).

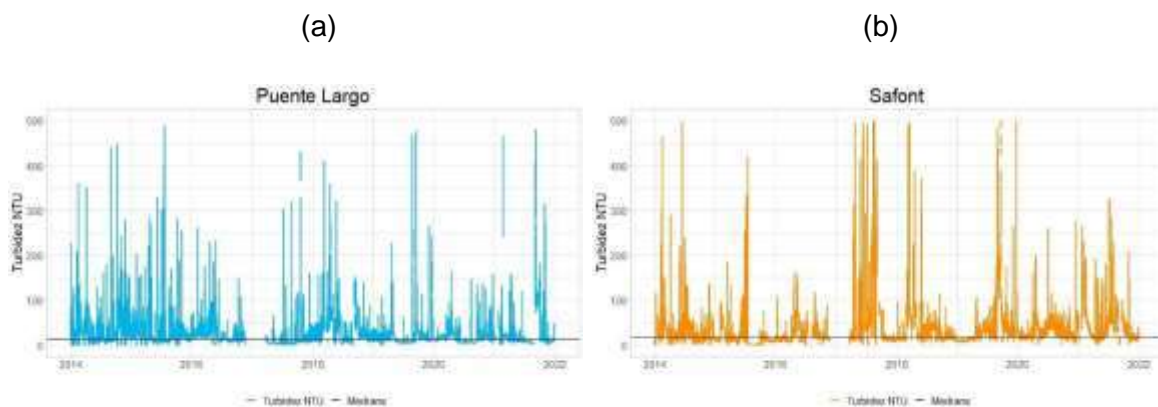




Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

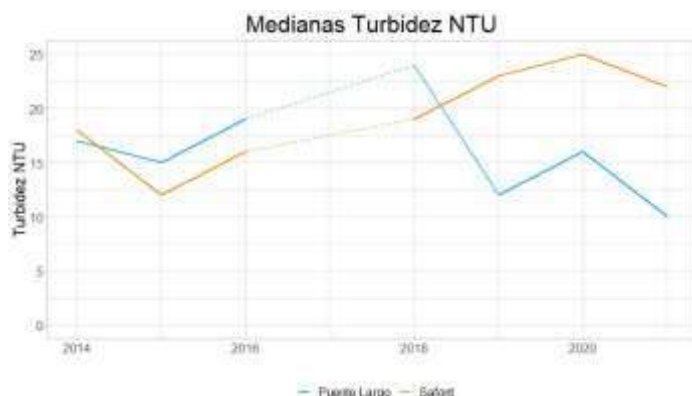
En cuanto a la turbidez, los datos SAICA muestran unos valores puntuales y medios altos (Figura 31). A modo de aclaración, las normas de calidad ambiental del BOE (2015) no dan indicadores de referencia sobre este parámetro para la valoración de la calidad de las masas de agua. Para las aguas potables se establece un valor de referencia de 0,8 UNF a la salida de la estación potabilizadora o depósito de cabecera, siendo el valor de aptitud de 2 UNF en estas y de 6 UNF en la red de abastecimiento (BOE, 2023). Para aguas reutilizadas de clase A para uso agrícola el límite legal se sitúa en 10 UNF (DOUE, 2020). En las gráficas para cada estación observamos picos puntuales muy altos, de en torno a 500 UNF en el caso de Puente Largo y llegando a los 1000 UNF en Safont. No obstante, como se puede observar en la Figura 32, las medianas anuales de UNF para las dos estaciones se sitúan por debajo de los 25 UNF. Hay que tener en cuenta que este parámetro también está relacionado con causas naturales: cuando aumenta el caudal, también lo hace los sólidos en suspensión y esto hace que aumente la turbidez, pero no tiene por qué ser indicativo de peor estado.

Figura 31. Variación de turbidez (UNF) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 32. Comparación de las medianas de turbidez (UNF) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).



En cuanto al parámetro amonio, tanto el río Jarama en Aranjuez como el Tajo a su paso por Toledo superan habitualmente los valores del buen estado de las aguas del RD 817/2005 (BOE,2015). En el caso del Jarama, el 88,6 % de los datos quinceminutales, es decir, el 88,6 % del tiempo transcurrido en estos ocho años completos considerados en el estudio, el amonio de encontró en una concentración mayor que la permitida por la legislación. Esta cifra sigue siendo muy alta en el caso del Tajo a su paso por Toledo, el 73,8 %. Pero es que el 84,2 % del tiempo, esa concentración en el Jarama superó el doble de lo permitido (un 63,5 % en el Tajo en Toledo), hasta llegar a un máximo de 39,2 mg/l en el Jarama en Aranjuez y de 50 mg/l en el Tajo en Toledo, lo que supone que ha llegado a estar más de 65 veces por encima del valor máximo permitido, que recordemos que en Puente Largo es 0,6 mg/l, y 50 veces por encima del valor máximo permitido en Safont (que es de 1 mg/l).

El amonio es el indicador más claro de contaminación urbana, de todos los que aparecen en este estudio. Los valores tan elevados de amonio, salvo que haya vertidos directos de instalaciones ganaderas o similares, son indicadores de vertidos urbanos con una depuración incompatible con el buen estado de las aguas receptoras. En el análisis de ambas estaciones de la serie completa (2014-2021) se observa cómo se superan los límites de referencia del buen estado (Figura 33). En el caso de Puente Largo, la mediana de toda la serie se sitúa en 5,7 mg/l. Teniendo en cuenta que el límite del buen estado está en 0,6 mg/l, la mediana es 9,5 veces superior y, por tanto, esto quiere decir que la mitad de las medidas se ha superado 9,5 veces el valor máximo permitido. En Safont la mediana es 2,2 mg/l, luego, con un valor de referencia de 1 mg/l, esto implica que la mitad del tiempo la concentración de amonio ha estado por encima de 2,2 veces el valor máximo permitido. Recuérdese que los valores de referencia de este parámetro dependen del tipo de masa de agua: para las masas de agua tipo río RT16 (como es el caso del Jarama en Puente Largo) se establece un valor de límite de buen estado a moderado en 0,6 mg/l mientras que para las masas de agua tipo río RT 17 (caso del Tajo en Toledo) se establece en 1 mg/l (véase Tabla 3).

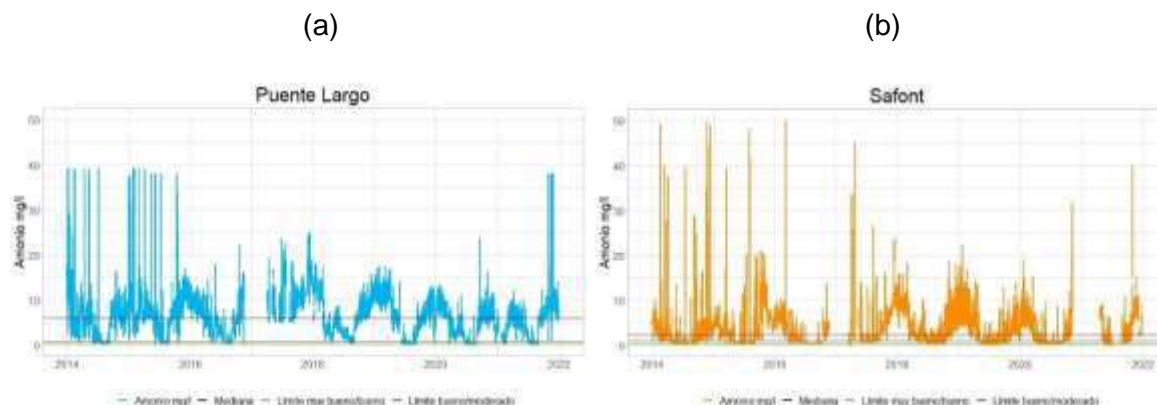
Quizás más llamativos son los picos extremos con los que nos encontramos. En Puente Largo existen numerosos datos que alcanzan los 39 mg/l, es decir, 65 veces superiores a las concentraciones de amonio de referencia del buen estado. Igualmente, en la estación de Safont estos picos llegan a los 50 mg/l, 50 veces más que las concentraciones permitidas.

La gráfica comparativa de las medianas anuales muestra que el amonio está por encima de los valores de referencia en ambas estaciones, pero muy especialmente en la estación de Puente Largo (Figura 34). Ambas medianas se mantienen en paralelo prácticamente durante todo el periodo, experimentado una subida en ambos casos en 2015. La falta de datos en Safont a finales de 2020 y principios de 2021 hace que no se puedan extraer conclusiones válidas, ya que la mediana en esos años, así como la general del conjunto del periodo es artificialmente más baja. No obstante, la comparación de las gráficas completas sí permite afirmar la presencia de concentraciones de amonio puntuales más altas en Safont que en Puente Largo, lo que viene a confirmar la tesis de la existencia de fuentes de contaminación intermedias, entre Aranjuez y Toledo, que harían superar aún más los incumplimientos provenientes del Jarama.

Estos datos de alta concentración de amonio en el Tajo en Toledo confirman la hipótesis de que los altos datos de conductividad son debidos a la contaminación como motivo adicional a la presencia del flujo de descarga de agua salada.

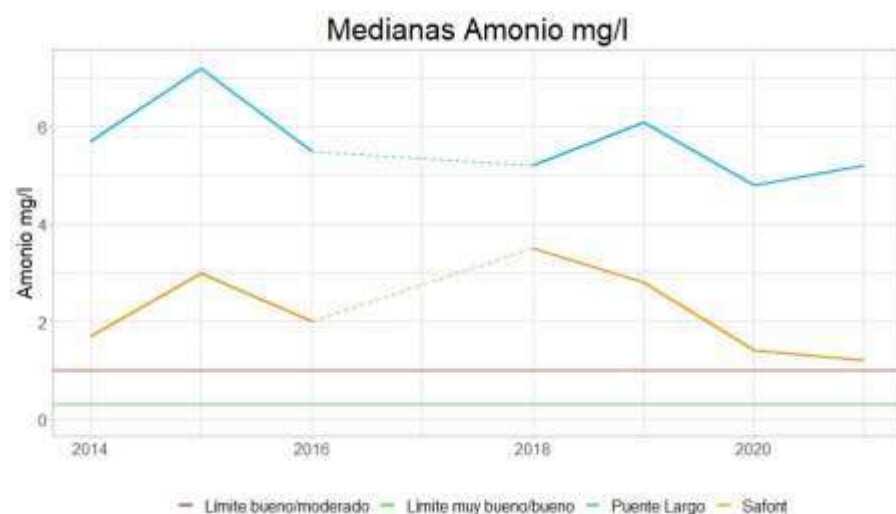


Figura 33. Variación de amonio (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

Figura 34. Comparación de las medianas de amonio (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (izquierda) y de Safont (derecha) de la Red SAICA (2014-2021).



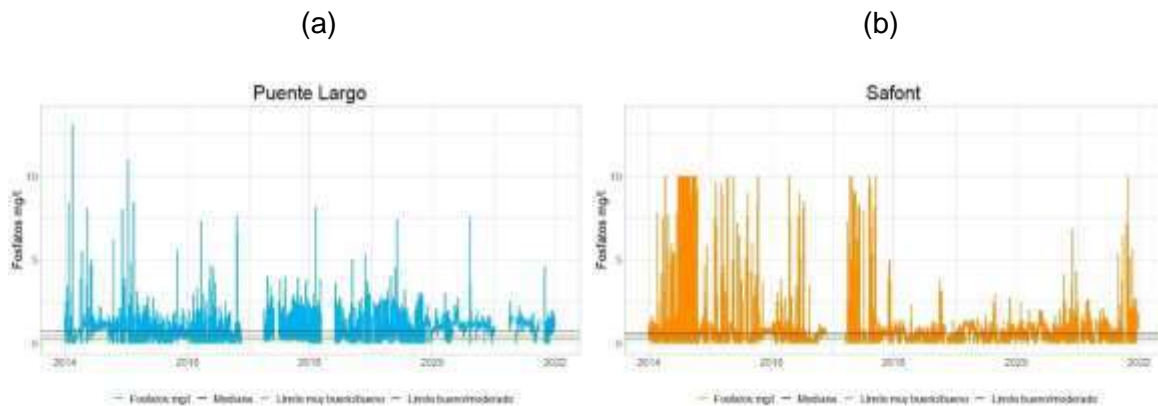
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

En la Figura 35 puede observarse que en una gran cantidad de periodos los fosfatos sobrepasan los valores que el Real Decreto 817/2005 considera como buenos. En el caso de Puente Largo, la mediana de toda la serie se sitúa en 0,7 mg/l y en Safont en 0,6 mg/l, lo que indica que la mitad del tiempo se ha estado sensiblemente por encima de la concentración máxima permitida (0,4 mg/l en ambos casos), por lo que nos encontramos ante un incumplimiento generalizado de los límites de referencia: el 76,9 % del tiempo en Puente Largo y el 74,0 % del tiempo en Safont se ha incumplido la normativa vigente, e incluso el 46,3 % en Puente Largo y el 34,6 % en Safont se ha superado el doble del máximo legal permitido. En cuanto a los valores máximos, en Puente Largo se alcanza una concentración de 13,1 mg/l y valores recurrentes entre 2 y 8 mg/l para todos los años de la serie. En el caso de Safont,



existen numerosos episodios cortados en 10 mg/l hasta 2017 (máxima capacidad de medición técnica, según ha sido comunicado por la CHT), así como subidas recurrentes de más de 2 mg/l en todos los años de la serie. Hay que añadir que no se observan correlaciones temporales, en todos los casos, entre los valores máximos de Puente Largo y Safont, de donde se puede deducir que a partir de Puente Largo hay fuentes puntuales que aportan fosfatos al río Tajo antes de llegar a Toledo.

Figura 35. Variación de fosfatos (mg/l) en las estaciones de Puente Largo (a) y de Safont (b) de la Red SAICA (2014-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

En la gráfica de los valores medianos de cada año, se puede observar que ambas estaciones están por encima de los valores del Real Decreto 817/2005 en todos los años (Figura 36). De 2015 a 2019 la mediana de la concentración de fosfatos en Safont ha sido superior a la de Puente Largo, de donde se podría deducir que Safont tiene fuentes de fosfatos adicionales que intervienen en la calidad del río Tajo al margen de la contaminación que ya proviene del río Jarama. Analizando la gráfica comparativa del año 2021 (véase Anexo) se comprueba la falta de datos en la estación de Puente Largo durante ese año, por lo que este dato de 2021 debe ser tomado con cautela.

Figura 36. Comparación de las medianas de fosfatos (mg/l) en las estaciones de Puente Largo y de Safont de la Red SAICA (2014-2021).

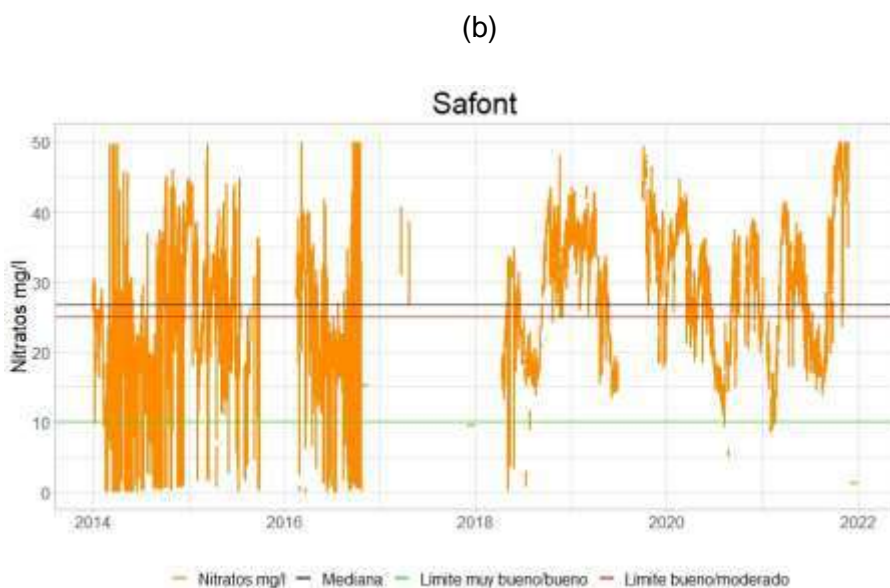
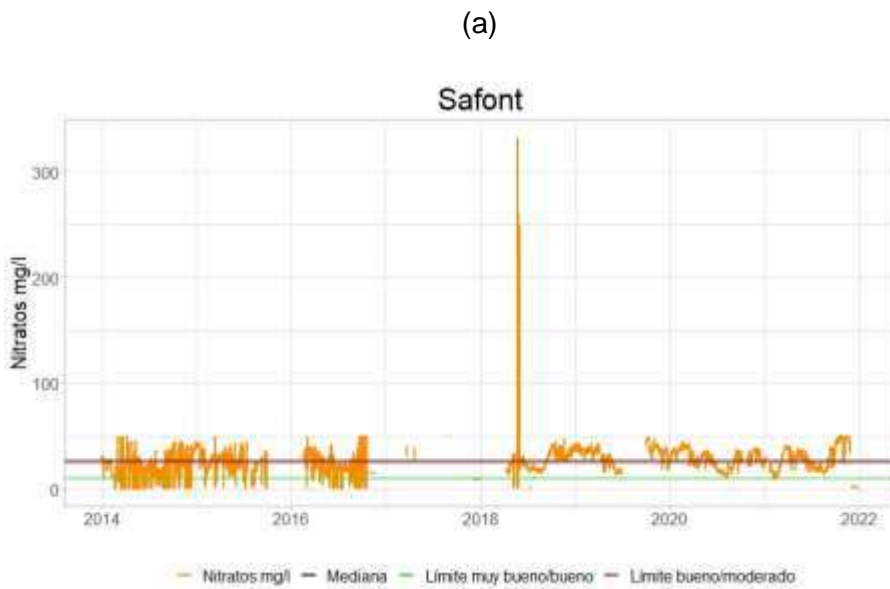


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).



Respecto a los nitratos, el análisis comparativo no ha sido posible, ya que en la estación de Puente Largo no se dispone de datos; solo están disponibles en Safont. En la Figura 37 se aprecia que una gran cantidad de datos (56,50 %) sobrepasa el valor de referencia de nitratos (BOE, 2015) para valorar esas aguas en buen estado bueno (25 mg/l). Esto es indicativo del grado de contaminación del río Tajo a su paso por Safont. Además, se observa un gran pico que podría tener relación con una descarga puntual o con fallos técnicos en los aparatos de medición (máximo alcanzado de 332 mg/l). El hecho de no contar con datos de nitratos en las estaciones aguas arriba impide detectar el origen de la fuente.

Figura 37. Variación de nitratos (mg/l) en la estación SAICA de Safont (2014-2021). (a) Serie completa; (b) serie en la que han suprimido los valores >100 mg/l.

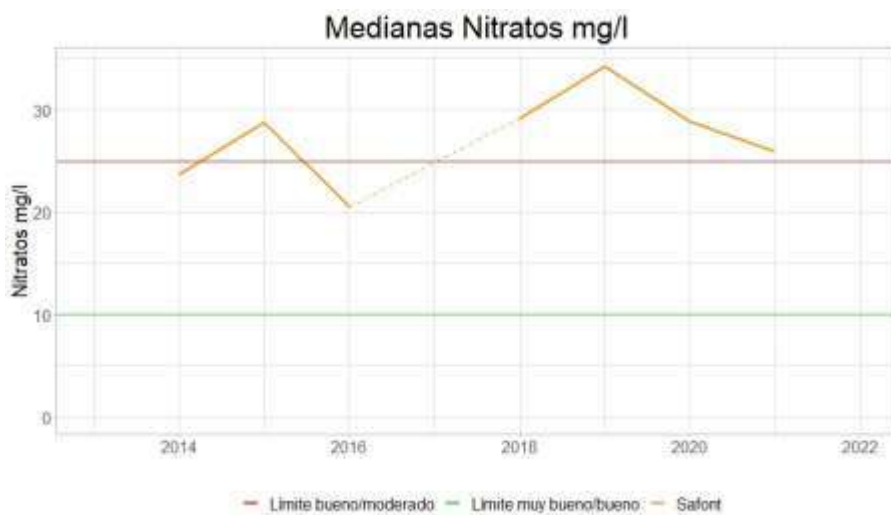


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).



En el análisis de las medianas anuales, se observa que salvo los años 2013, 2014 y 2016, el resto de los años las medianas han estado por encima de los valores de referencia, indicando valores que impiden alcanzar buen estado (Figura 38). Obsérvese que mientras que el 56,50 % del tiempo la concentración de nitratos en Safont se encuentra por encima de la permitida, sin embargo, solo el 1,10 % del tiempo dicha concentración se ha encontrado por encima del doble de lo permitido debido a que los datos parecen tener su límite máximo de cuantificación en 50, por cuestiones técnicas, según la información facilitada por la CHT. Merece la pena destacar también que el 25 % del tiempo la concentración de nitratos se ha encontrado por encima de 34,3 mg/l.

Figura 38. Comparación de las medianas de nitratos (mg/l) en la estación SAICA de Safont (2016-2021). Fuente CHT. Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

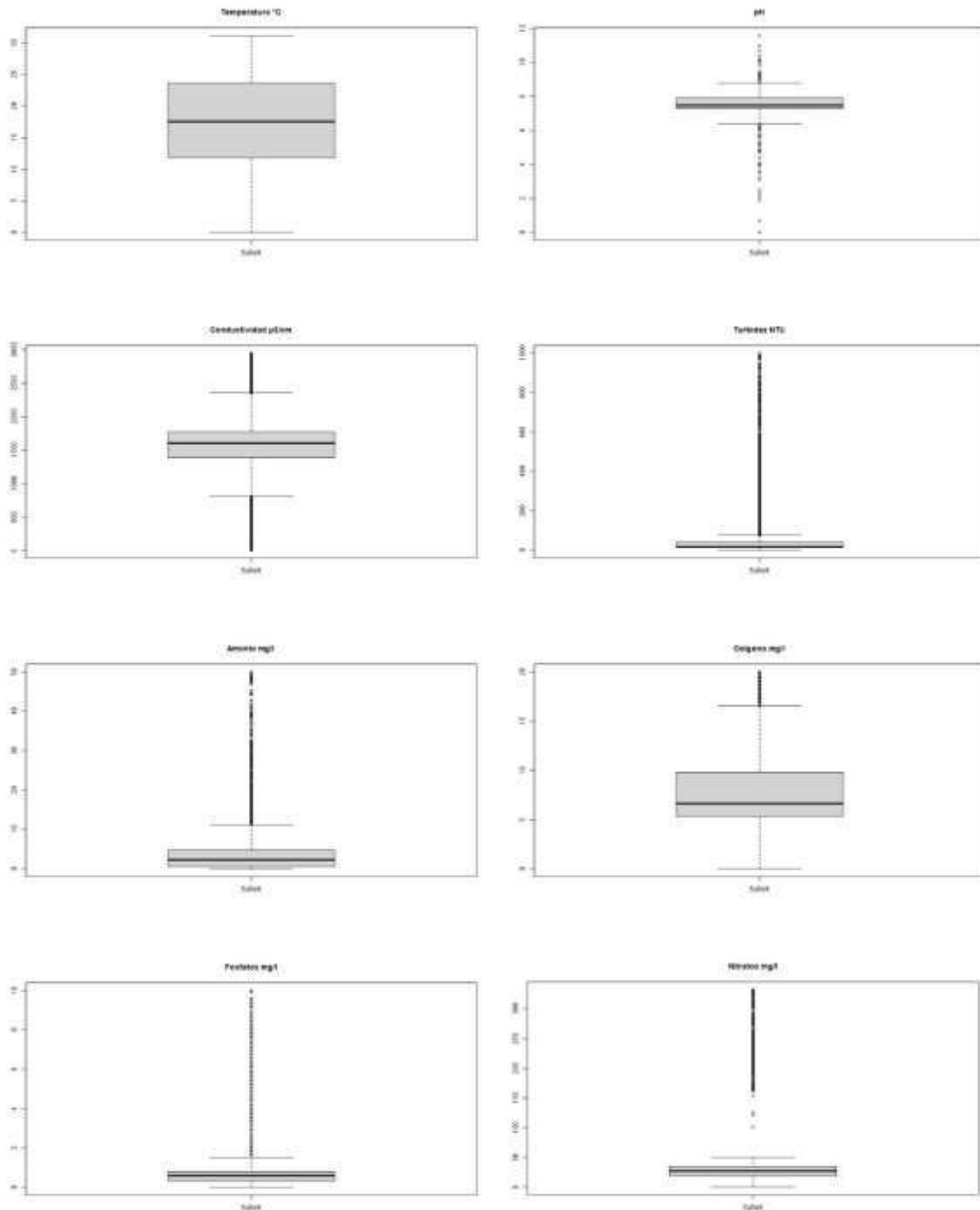
Dados los altos niveles de amonio, fosfatos y nitratos que se detectan, sería necesario valorar hasta qué punto, además de la contaminación procedente de los vertidos autorizados, estos podrían estar relacionados con desbordamientos y aliviaderos de la red de alcantarillado en momentos puntuales de lluvia, así como con la contaminación difusa procedente de la agricultura.

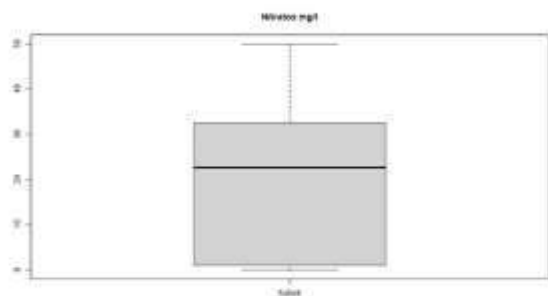
4.3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos durante los episodios de espumas

El análisis gráfico en detalle de la situación del río Tajo en la estación de Safont (Figura 39) nos indica la presencia de valores anómalos en todas las variables analizadas (salvo en la temperatura del agua). Esto nos indica la posibilidad de que durante los episodios de espumas hayan podido ocurrir circunstancias especiales, por lo que resulta necesario analizar el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos durante dichos episodios.



Figura 39. Box and whiskers-plot de los distintos parámetros fisicoquímicos para la serie completa en Safont en el periodo 2014-2021.





En general, en dicha localización, el análisis multivariante de los parámetros fisicoquímicos muestra una correlación media positiva entre la temperatura, el pH, la conductividad y el oxígeno ($0,34 < r < 0,71$, siendo r el coeficiente de correlación lineal de Pearson) y una correlación negativa, de $r = -0,52$, entre la temperatura del agua y el amonio, indicativa, con un grado de correlación medio, de mayor concentración de amonio en los meses más fríos del año. El resto de las variables presentan una correlación baja entre ellas, no reseñable (Tabla 9).

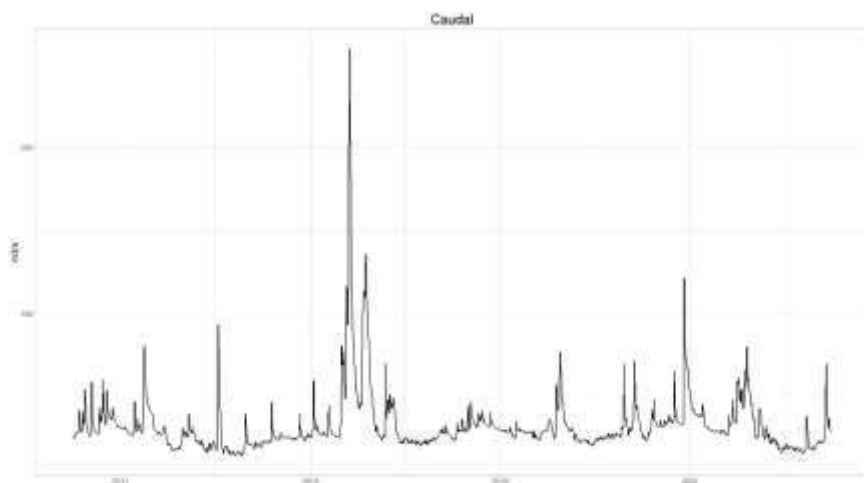
Tabla 9. Matriz de coeficientes de correlación entre las variables dos a dos en la serie completa en Safont en el periodo 2014-2021.

	Tempe- Ratura	pH	Conduc- tividad	Oxígeno	Turbidez	Amonio	Fosfatos	Nitratos
Temperatura	1,00	0,66	0,46	0,48	0,06	-0,52	-0,08	-0,19
Ph	0,66	1,00	0,51	0,71	0,09	-0,36	-0,14	-0,03
Conductividad	0,46	0,51	1,00	0,34	-0,20	-0,15	-0,04	0,10
Oxígeno	0,48	0,71	0,34	1,00	0,17	-0,33	-0,23	-0,07
Turbidez	0,06	0,09	-0,20	0,17	1,00	-0,19	-0,14	-0,15
Amonio	-0,52	-0,36	-0,15	-0,33	-0,19	1,00	0,07	0,12
Fosfatos	-0,08	-0,14	-0,04	-0,23	-0,14	0,07	1,00	0,15
Nitratos	-0,19	-0,03	0,10	-0,07	-0,15	0,12	0,15	1,00

De la serie de caudales medios diarios circulantes en la estación de aforos de Puente de Algodor (que recuérdese que se encuentra en el río Tajo a unos 25 km de Safont, aguas arriba) durante los cuatro años hidrológicos que abarca los episodios de espumas (desde 1 de octubre de 2016) y hasta donde hay datos disponibles (30 septiembre de 2020), se concluye un comportamiento absolutamente regulado del río, que nada tiene que ver con el comportamiento natural, sin que puedan apreciarse ni siquiera variaciones estacionales periódicas (véase Figura 40).



Figura 40. Caudales medios diarios circulantes en la estación de Puente de Algodor (río Tajo).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CEDEX (2023).

Centrando el foco en los 34 episodios de espumas recogidos de las diferentes fuentes documentales (Tabla 4), que recuérdese que no son todos los que han existido sino solo de aquellos de los que ha sido encontrada documentación, en primer lugar, resulta imprescindible estudiar la serie de caudales circulantes. Teóricamente, a mayor caudal, se prevé mayor agitación del agua y, por tanto, mayor cantidad de espumas, debido a que en esos casos el agua es capaz de sobrepasar los azudes, disponiendo de mayor superficie de turbulencia. Se han analizado los caudales medios diarios (m^3/s) del día anterior, teniendo en cuenta esos 25 km de distancia y que las noticias se suelen referir a primera hora de la mañana (normalmente). Es decir, tendrá más influencia la información del día anterior que la del día de la noticia.

Del análisis de los caudales diarios, se deduce que el caudal no afecta a la generación de espumas, ya que los días con episodios de espumas se corresponden con caudales que oscilan entre el percentil 5 y el 98 de la serie completa del mes correspondiente. En concreto, 11 de los 29 días con dato de caudal (el 37,9 %) (obsérvese que los datos de 2021 no están disponibles al cierre de esta investigación), los días de espumas el caudal se encontró entre la mitad de los días con menor caudal (por debajo de la mediana del caudal del mes) y 18 de 29 (62,1 %) entre la mitad de los días con mayor caudal (por encima de la mediana del caudal del mes) (Tabla 10).

Tabla 10. Caudal medio diario en Toledo y percentil que ocupan respecto del correspondiente mes durante los episodios de espumas.

Episodios de espumas en el río Tajo a su paso por Toledo	Caudal Tajo en Puente de Algodor (m^3/s) *	Caudal medio mensual	Percentil
15-oct-2016	40,272	29,116	94
30-oct-2016	30,015	29,116	70
01-dic-2016	39,650	36,559	82
05-dic-2016	34,707	36,559	66
09-dic-2016	40,895	36,559	83
05-ene-2017	30,591	32,245	61



13-feb-2017	33,514	32,613	80
22-jul-2017	19,933	23,225	38
02-ago-2017	15,771	22,786	14
20-oct-2017	46,529	29,116	98
21-oct-2017	35,129	29,116	85
22-oct-2017	29,843	29,116	67
06-dic-2017	24,603	36,559	5
07-dic-2017	25,514	36,559	15
09-dic-2017	25,046	36,559	8
31-dic-2017	25,514	36,559	15
15-ene-2018	31,909	32,245	69
21-ene-2018	27,384	32,245	25
22-ene-2018	26,916	32,245	18
25-ene-2018	26,449	32,245	13
08-feb-2018	36,260	32,613	79
03-mar-2018	80,54	46,977	87
04-mar-2018	74,604	46,977	85
17-mar-2018	201,154	46,977	98
09-jul-2018	22,412	23,225	55
08-oct-2018	24,160	29,116	21
29-nov-2018	36,862	32,517	81
19-dic-2018	32,966	36,559	48
09-feb-2019	30,360	32,613	68
23-feb-2021	-	32,613	
24-mar-2021	-	46,977	
29-abr-2021	-	47,379	
23-jun-2021	-	24,383	
24-oct-2021	-	29,116	
Media caudal diario (m ³ /s):	34,495		

Una vez descartado el efecto del caudal sobre la generación de espumas, se observa que los episodios de espumas que han podido ser documentados y que se recogen en la Tabla 4 (n=34) ocurren, en mayor medida, en los meses fríos, en los meses de octubre a febrero (n=25, 73,5 %), de los cuales, 20 (58,8 % del total) tienen información en la Red SAICA (CHT, 2022b). Para evitar que el efecto estacional de la mayor parte de los parámetros distorsione los resultados, se ha optado por comparar los datos de octubre a febrero, ambos inclusive, de la serie completa de parámetros fisicoquímicos en Safont con lo ocurrido durante estos 20 episodios de espumas.

Una vez observado el impacto de la carga contaminante del río Jarama sobre el río Tajo en la sección anterior, ahora se plantea, con los mismos datos de la Red SAICA, abordar el estudio de qué circunstancias especiales han podido ocurrir en estos parámetros fisicoquímicos durante los episodios de espumas que hayan podido ser causantes de su aparición. Para ello se plantea un primer enfoque cuantitativo, en el que se muestra un análisis comparativo entre la serie completa de parámetros fisicoquímicos y la serie condicionada a los episodios registrados de espumas. En segundo lugar, se plantea un enfoque cualitativo, que permita fijar la atención solo en los valores que, en los días que se han podido registrar como que hubo espumas, se encuentran entre el 25 % de los datos con mayor concentración de contaminantes de la serie histórica, valores que se reciben la denominación de “Muy altos”.

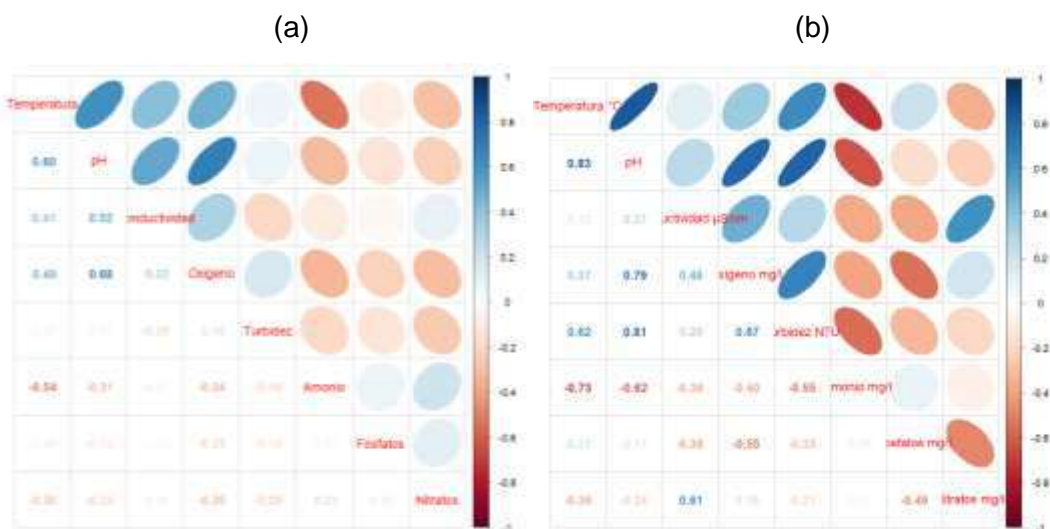
4.3.2. Análisis cuantitativo de variables en episodios de espumas



La Figura 41 muestra mayor correlación entre la temperatura y el pH durante los 20 episodios de espuma que en la serie completa de octubre a febrero, pasando de $r = 0,60$ a $r = 0,83$: a menor temperatura, recordemos que nos referimos a meses con temperatura del agua más fría, menor pH. Así mismo, se incrementa la correlación entre temperatura y turbidez, que con la serie completa era nula, ahora llega hasta 0,62; en estos meses más fríos, cuando la temperatura del agua es más baja, se observa menor turbidez. Asimismo, desaparece la correlación entre temperatura y conductividad y se refuerza, se hace más patente, la correlación negativa entre temperatura y amonio: dentro de estos meses de temperaturas más bajas, a menor temperatura, mayor concentración de amonio ($r = -0,73$). En el caso del pH, durante los episodios de espumas se desvanece su correlación con la conductividad, aumenta con el oxígeno (hasta $r = 0,79$), aumenta hasta 0,81 con la turbidez y aumenta (en negativo) hasta el $-0,62$ con el amonio; es decir, que días con pH más bajo, que corresponden con días con temperaturas más bajas dentro de los meses más fríos, se asocian con menores concentraciones de oxígeno, de menor turbidez y mayor concentración de amonio. Por su parte, en la conductividad aparece durante los episodios de espumas correlación con los nitratos. El oxígeno intensifica su correlación positiva con la turbidez y su correlación negativa con el amonio y los fosfatos: a más fosfatos y más amonio, menor cantidad de oxígeno en el agua. La turbidez intensifica también su correlación negativa sobre todo con el amonio. Por último, durante los días de espumas aparece correlación negativa entre fosfatos y nitratos: a menor concentración de nitratos, mayor de fosfatos, lo que nos podría indicar el origen urbano, no agrario, de los fosfatos.

En resumen, todo parece indicar que, en los meses más fríos del año, y dentro de ellos, los días más fríos de los que se han identificado con presencia de espumas, el pH del agua, la turbidez y la concentración de oxígeno eran más bajas, mientras que la concentración de amonio y nitratos era más alta. No obstante, recuérdese que de los coeficientes de correlación no puede, en ningún caso, deducirse causalidad.

Figura 41. Análisis comparativo entre coeficientes de correlación correspondientes a la serie completa en los meses fríos (a) y a la serie con episodios de espuma registrados (b).





De la Tabla 11 y la Figura 42, tras llevar a cabo el contraste de diferencia de medias entre la serie completa de octubre a febrero de 2014 a 2021 y la serie de episodios de espumas en esos meses, se desprende:

- (i) que, atendiendo a las medias, la diferencia media de tres centésimas de grado centígrado no es estadísticamente significativa, por lo que no puede afirmarse que los episodios de espumas coincidan con momentos de temperaturas más bajas, pero sí podría afirmarse atendiendo a las medianas, cuyas diferencias son estadísticamente diferentes, no pareciendo importante, no obstante, la diferencia de 1,3° entre la temperatura del agua de la serie completa y de la serie de episodios de espumas desde un punto de vista ambiental;
- (ii) los resultados obtenidos acerca del pH deben ser tomados con cautela debido a la alta variabilidad de la serie en los primeros años. No obstante, las medianas coinciden;
- (iii) el oxígeno sí es significativamente más bajo desde un punto de vista estadístico durante los episodios registrados con espumas (pasando de una concentración media de 6,37 a 5,47, siendo las medianas de 6,10 y 5,70, respectivamente);
- (iv) la conductividad también es más baja por término medio en los episodios de espumas (pasando de 1451,6 a 1304,5 en media y de 1549 a 1367 en mediana) obedeciendo en mayor medida a causas naturales de composición del terreno;
- (v) la turbidez también presenta valores más bajos, si bien su origen no se relaciona en este caso solo con la contaminación.
- (vi) en estos episodios de espumas registrados se observan mayores concentraciones medias de amonio que en la serie completa en los meses fríos (de una media de 5,22 se pasaría a una media de 8,18, siendo aún mayor la diferencia de medianas que pasa de 4,8 a 9,1 mg/l), si bien la cantidad de datos anómalos de la serie completa que no aparecen durante los episodios de espumas nos indicarían la cantidad de días en los que ha habido espuma en el río, pero no han sido reflejados en los medios ni detectados por la ciudadanía;
- (vii) también los fosfatos aparecen más altos por término medio en los días con espumas (0,71 frente a 1,18, siendo las diferencias en medianas también estadísticamente significativas, de 0,7 a 0,8).
- (viii) en los nitratos existen diferencias significativas entre sus valores medios, siendo menor la concentración en los días de espumas, existiendo una mayor variabilidad en los episodios de espumas que en la serie completa. Este último resultado debe ser interpretado con gran cautela, ya que la mayor parte de los episodios de espumas no está disponible el dato de la concentración de nitratos.

En general, se ha optado por no eliminar los datos anómalos de las series, dada la importancia de los mismos en el tema que nos ocupa precisamente, los episodios de espumas.

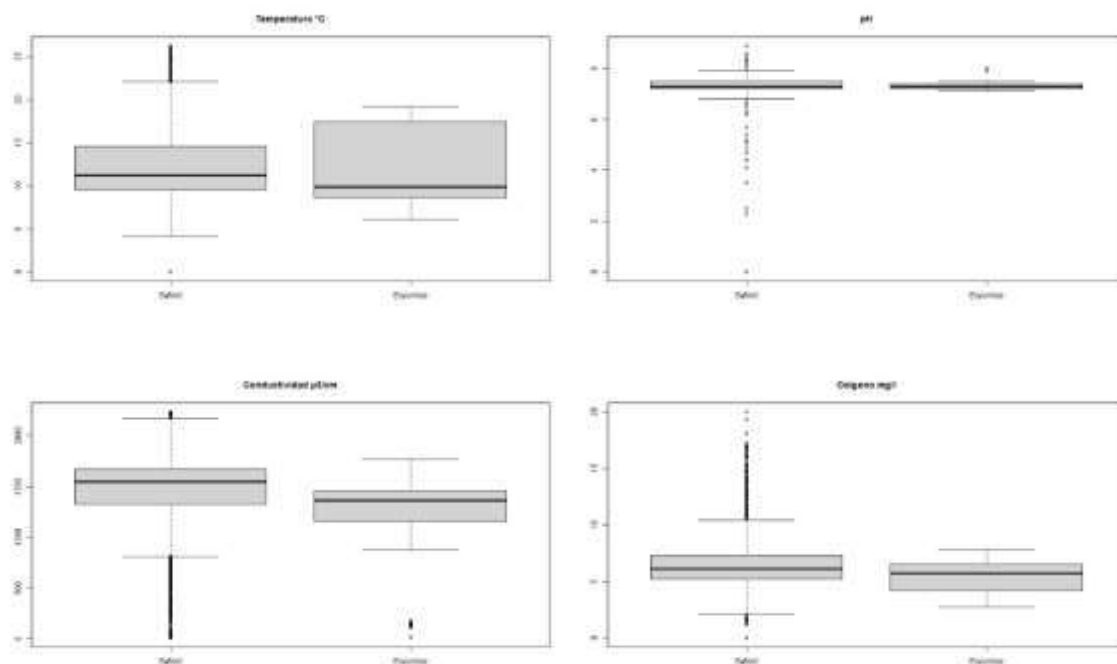


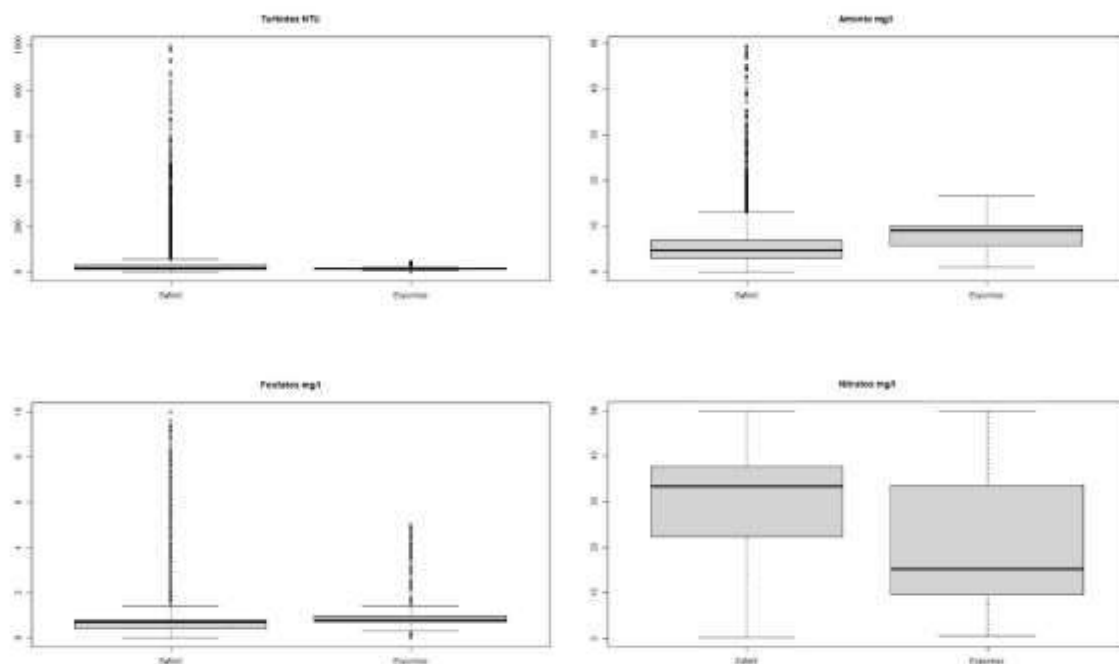
Tabla 11. Contraste de diferencia de medias entre la serie completa de octubre a febrero de 2014 a 2021 y la serie de episodios de espumas en esos meses.

	Medias		Brown-Forsythe Test	Medianas		Test remuestreo
	Safont oct-feb 2014-2021	Episodios de Espumas	p-valor	Safont oct-feb 2014-2021	Episodios de Espumas	p-valor
Temperatura (°C)	12,25	12,22	0,9632316	11,20	9,90	<0,001***
pH	7,39	7,33	<0,001***	7,30	7,30	1
Conductividad (µS/cm)	1451,96	1304,50	<0,001***	1549,00	1367,00	<0,001***
Oxígeno (mg/l)	6,37	5,47	<0,001***	6,10	5,70	<0,001***
Turbidez (mg/l)	28,03	14	<0,001***	16,00	14,00	<0,001***
Amonio (mg/l)	5,22	8,18	<0,001***	4,80	9,10	<0,001***
Fosfatos (mg/l)	0,71	1,18	<0,001***	0,70	0,80	<0,001***
Nitratos (mg/l)	24,12	22,06	<0,001***	33,36	15,20	<0,001***

Nota: ***estadísticamente significativo al 1 %.

Figura 42. Comparación de la distribución de la serie en Safont en los meses de octubre a febrero, ambos inclusive (box-plot izquierda) y la serie de los episodios de espumas detectados en los mismos meses (box-plot derecha) para los parámetros fisicoquímicos.





Es importante recordar en este punto que los 34 días que han conseguido documentarse en esta investigación como días con espumas no son todos en lo que dichas espumas han estado presentes. No obstante, si de la serie completa hubieran podido ser eliminados todos los episodios con espumas, los contrastes estadísticos realizados apuntarían en el mismo sentido y serían más determinantes, si cabe.

4.3.3. Análisis cualitativo de variables en episodios de espumas

A continuación, la investigación se dirige al análisis de los valores más altos de fosfatos y amonio en los días que se ha podido registrar que hubo espumas (y se dispone de información: $n=29$). En concreto, aquellos días que se encuentran entre el 25 % de los datos con mayor concentración de contaminantes de la serie histórica han sido calificados como “Muy altos” frente al resto, con el fin de simplificar la interpretabilidad de los datos cuantitativos. Teniendo en cuenta que la mayor parte del tiempo se superan los límites permitidos de amonio y fosfatos en el Tajo en Safont (el 73,8 % y el 74,0 % del tiempo, respectivamente) y en la estación de Puente Largo —en el río Jarama a la altura de su desembocadura en Aranjuez— (88,6 % y 76,9 % del tiempo, respectivamente), la decisión de convertir la variable cuantitativa en cualitativa ha sido tomada para mostrar de una forma más gráfica y comprensible la relación entre el grado de contaminación en Safont y en Puente Largo en esos días registrados con presencia de espumas (véase en Tabla 5 el criterio seguido para el establecimiento de las categorías).

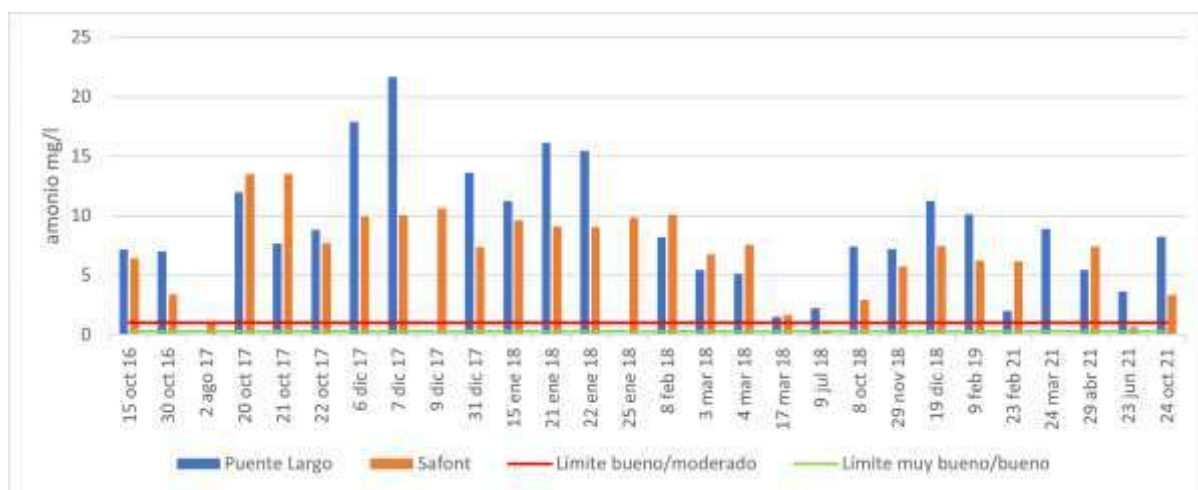
Dos de los factores que parecen fuertemente relacionados con la aparición de espumas en Toledo son, por un lado, el amonio, que aparece muy alto en el 70,4 % de los episodios y, por otro, los fosfatos, que fueron registrados como muy altos el 60 % de los días con espumas (véase Tabla 12). Se observa que el 83,3 % de días en los que se han registrado espumas, o



el amonio o los fosfatos podrían considerarse como muy altos según esta clasificación, sobrepasándose, en cualquier caso, en todos los demás días los límites de cambio a buen estado con la excepción de un solo caso (19 de julio de 2018), lo que supone que esto ocurre en un 95,8 % de los días. Se puede, por tanto, deducir una alta correspondencia de casos con concentraciones muy altas de fosfatos o amonio con los episodios de espumas. No en todos los casos en los que han aparecido espumas estos parámetros han estado presentes en concentraciones que superan el tercer cuartil de la serie larga, que han sido calificados como “muy altos”, aunque sí en la mayor parte de ellos. Lo que sí se observa en todos estos casos son unas concentraciones por encima de los valores de referencia (BOE, 2015), ya sea de amonio o de fosfatos o de ambos componentes al mismo tiempo, aunque este hecho ocurre también en muchos otros días. Obsérvese que, en la mayor parte de los episodios de espumas, la concentración de nitratos no está disponible.

Al compararlos con los datos del río Jarama en Puente Largo, justo antes de la desembocadura, podemos inferir que los parámetros analizados tienen un comportamiento distinto (Tabla 12). El amonio aparece alto en el 48 % de los episodios en Puente Largo. De estos, el 57,9 % (11 días) de esos días son coincidentes con los días de amonio alto en Safont, de donde se infiere que, al menos en parte, el origen de estas altas concentraciones procede de las aguas del río Jarama. Los fosfatos, sin embargo, son coincidentes únicamente en un 13,3 % de los episodios, por lo que su origen debe estar en posibles aportes contaminantes entre el río Jarama y la estación de Safont. La información cuantitativa de este análisis se muestra en las figuras 43 y 44.

Figura 43. Concentración de amonio (mg/l) durante los episodios de espumas registrados en Toledo. Comparativa entre las estaciones de la Red SAICA de Puente Largo (32 horas antes, ± 6 horas) y Safont (2016-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).



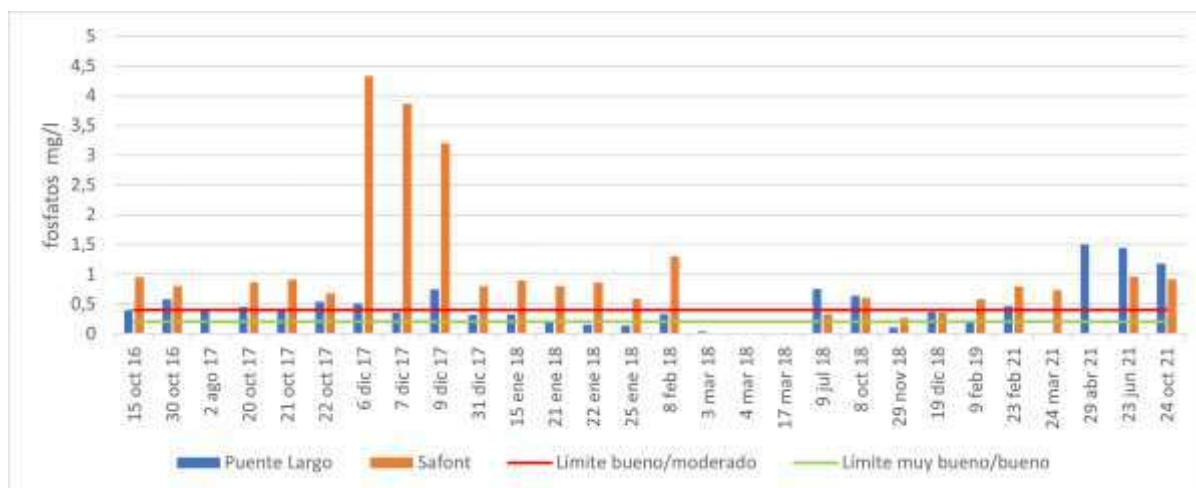
Tabla 12. Análisis cualitativo de los parámetros fisicoquímicos del río Jarama en su desembocadura (estación de Puente Largo) y del río Tajo en Toledo (estación de Safont)

Episodios de Espumas	Puente Largo							Safont							
	Temperatura °C	pH	Conductividad µS/cm	Oxígeno mg/l	Turbidez NTU	Amonio mg/l	Fosfatos mg/l	Temperatura °C	pH	Conductividad µS/cm	Oxígeno mg/l	Turbidez NTU	Amonio mg/l	Fosfatos mg/l	Nitratos mg/l
Q3 (Tercer cuartil de la serie) En el oxígeno se consigna el Q1 (primer cuartil)	22,1	7,5	1546	4,3	25	8,6	1	23,9	7,9	1759	5,3	39	5,1	0,8	34,3
15-oct-16	17,6	7	857,3	1,1	26,6	7,2	0,4	17,3	7,3	1005	3,8	11,4	6,4	1	5,5
30-oct-16	18,6	7,2	1067,6	4,7	22,7	7	0,6	18	7,3	1433	4,1	16,7	3,4	0,8	15,2
22-jul-17	24,4	7,6	1829,3	9,2	3	11	0,5	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
02-ago-17	23,8	sin datos	1935,9	10,4	3,1	sin datos	0,4	26,4	7,5	1378,6	18,7	177,9	1	0	sin datos
20-oct-17	16,7	sin datos	1067,1	6,6	214,4	12	0,5	17,6	7,2	1015,8	3,2	14,3	13,5	0,9	sin datos
21-oct-17	16,7	sin datos	sin datos	8	102,7	7,7	0,4	18,2	7,2	990,8	3,5	16,2	13,5	0,9	sin datos
22-oct-17	17,8	sin datos	1047,6	5,2	67,7	8,8	0,5	18,2	7,2	1120,8	3,7	15,6	7,7	0,7	sin datos
06-dic-17	9	sin datos	1266,3	6,3	6,4	17,9	0,5	6,6	sin datos	1456,2	7,1	8,9	9,9	4,3	9,5
7-dic-2017	8,9	sin datos	1223,6	6,3	19,4	21,7	0,4	6,6	sin datos	1478,6	7,1	8,7	10	3,9	9,5
09-dic-17	9,9	sin datos	1246,5	5,9	6,7	sin datos	0,7	7,9	sin datos	1454,7	6,6	11,1	10,6	3,2	9,5
31-dic-17	sin datos	sin datos	sin datos	4,9	20,9	13,6	0,3	11,4	sin datos	1208	4,9	9,1	7,4	0,8	9,5
15-ene-18	9,7	7,2	1161,4	6,4	17	11,2	0,3	8,5	7,5	1277,4	6,1	20,3	9,6	0,9	sin datos
21-ene-18	10,1	7,3	1157,6	6,7	24	16,1	0,2	9,2	7,5	1351,1	6	13,9	9,1	0,8	sin datos
22-ene-18	10	7,2	1172,4	6,6	19,1	15,5	0,2	9,4	7,4	1288,5	5,8	11,6	9,1	0,9	sin datos
25-ene-18	10,9	7,4	1221,6	6,9	20	sin datos	0,1	9,5	7,4	1394,4	5,7	14,3	9,8	0,6	sin datos
08-feb-18	8,1	sin datos	955,3	6,4	40,6	8,2	0,3	7,7	7,4	1084,7	4,9	18,3	10,1	1,3	sin datos
03-mar-18	10,9	7,5	633	4,8	126,6	5,5	0	10,8	7,4	740,4	3,9	118,2	6,8	sin datos	sin datos
04-mar-18	10,7	7,6	sin datos	7	sin datos	1,5	sin datos	10,3	7,6	612,7	6,4	872,4	1,7	0	sin datos
17-mar-18	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	10,7	7,6	sin datos	7	#jDMV/0!	1,5	sin datos	sin datos
09-jul-18	24,6	7,3	1695,2	sin datos	7,6	2,3	0,8	27,3	8,5	1775,8	15,1	39	0,5	0,3	17
08-oct-18	19,1	7,3	1350,9	4,7	24,6	7,4	0,6	18,6	7,3	1751,9	5,6	13	2,9	0,6	40,2
29-nov-18	12,3	7,2	964,8	4	27,6	7,2	0,1	10,9	7,1	1416,1	6,4	19,5	5,7	0,3	27,6
19-dic-18	10,4	7,3	1167,4	5,9	15,4	11,2	0,4	9,7	7,2	1216,1	7,2	10,1	7,5	0,4	34,3
09-feb-19	10,2	7,2	1098,7	6,3	16,6	10,1	0,2	9,7	7,1	1585,8	7,5	9,3	6,2	0,6	31,6
23-feb-21	9,8	7,4	522,6	6,3	3,1	2	0,5	9,9	7,1	1247,5	8,6	30	6,2	0,8	24,5
24-mar-21	13,5	7,5	1189,1	4,1	13,4	8,9	sin datos	13,9	7,5	1733	6,1	17,8	sin datos	0,7	39,3
29-abr-21	17,8	7,4	1018,5	4,9	26,6	5,4	1,5	17,8	8,8	1407,3	1,5	12,3	7,4	sin datos	25,5
23-jun-21	20,9	7,4	1514,8	5,7	11,8	3,7	1,4	21,7	7,5	1742,2	5,3	22	0,6	1	sin datos
24-oct-21	17,4	7,9	1497,4	5,4	21,6	8,2	1,2	16,9	7,9	sin datos	4,7	26,5	3,4	0,9	50
N.º EPISODIOS que superan el tercer cuartil (o el primero en el caso del oxígeno)	3	5	3	3	7	12	3	2	3	1	10	4	19	15	4
% EPISODIOS que superan el tercer cuartil (o el primero en el caso del oxígeno)	10,3	17,2	10,3	10,34	24,1	41,4	10,3	6,9	10,3	3,4	34,5	13,8	65,5	51,7	13,8

Nota: En rojo, los valores de concentración de amonio y fosfatos calificados como “Muy altos”, correspondientes a las superaciones del tercer cuartil de la serie completa.



Figura 44. Concentración de fosfatos (mg/l) durante los episodios de espumas registrados en Toledo. Comparativa entre las estaciones de la Red SAICA de Puente Largo (32 horas antes, ± 6 horas) y Safont (2016-2021).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Red SAICA (CHT, 2022b).

4. Conclusiones

Según el análisis de los datos oficiales (Red CEMAS —CHT, 2022a— y Red SAICA —CHT, 2022b) las aguas del río Tajo a su paso por Toledo presentan unos niveles de contaminación muy altos por presencia de nutrientes, muy superiores a los valores de referencia establecidos por la normativa española (BOE, 2015) en virtud del cumplimiento de los objetivos medioambientales de la DMA (DOCE, 2000). Esta cuestión, que ya está presente en la literatura previa, ha sido puesta en evidencia de manera contundente con los datos más actuales presentes en las fuentes oficiales.

El análisis de los puntos de vertido autorizados de la cuenca del Tajo hasta que llega a Toledo indica que la principal causa de la baja calidad de sus aguas en este punto se encuentra en los aportes provenientes del río Jarama, ya que un 79,6 % de los vertidos autorizados hasta ese punto son vertidos a ese río. Del total de vertidos autorizados hasta Toledo, el 87,4 % provienen de las EDAR. Es especialmente relevante la contribución de las estaciones depuradoras de la Comunidad de Madrid (83,1 %). En el caso de obviar los vertidos autorizados sin carga orgánica destacable, es decir, si se detraen los vertidos efectuados, por ejemplo, por las piscifactorías y centrales térmicas y nucleares, cuyas aguas no contienen alta concentración de nutrientes, entonces, la responsabilidad del Jarama se eleva hasta el 92,2 %. Por contra, los vertidos autorizados aportados desde la desembocadura del Jarama hasta la ciudad de Toledo constituyen el 4,7 % del total, cifra que desciende al 3,9 % en el caso de contabilizar los vertidos con carga orgánica destacables. Este escenario implica que aproximadamente las dos terceras partes del agua que circula por el río Tajo en Toledo proviene de vertidos autorizados con carga orgánica destacable, si se vertiera el máximo autorizado. También hay que destacar que el río Tajo entre Aranjuez y Toledo no recibe aportaciones considerables de aguas limpias, ya que el caudal de todos sus afluentes se corresponde con el 100 % del volumen de vertidos autorizados, que recuérdese, es un máximo.



La red CEMAS muestra las altas concentraciones de nutrientes que soporta el tramo medio del río Tajo. Esto es especialmente grave en el caso de los fosfatos y amonio que mantienen unas concentraciones mayoritariamente altas a lo largo de todo el tramo, muy por encima del límite de buen estado. Comparando las concentraciones de nutrientes provenientes del río Tajo antes de la confluencia del río Jarama con las que provienen de este, se puede confirmar que el río Jarama es la principal fuente de la mala calidad en cuanto a amonio, fosfatos y nitratos. El comportamiento de los nitratos tiene una tendencia a aumentar en el recorrido del río Tajo hacia Toledo, producto de distintos factores (nuevos vertidos, contaminación difusa, proceso de nitrificación del amonio) que no han podido ser analizados con los datos disponibles. Se concluye, además, el efecto positivo que tiene la dilución de las aguas del río Tajo (más limpias hasta Aranjuez) en las aguas del río Jarama.

Los datos de la Red SAICA, quinceminutales, permiten concluir que, además del río Jarama (principal fuente de degradación de la calidad de las aguas), el río Tajo tiene otras fuentes de contaminación en su camino hacia Toledo. Las altas concentraciones de amonio halladas son indicativas de una insuficiente depuración de los residuos urbanos. En el Tajo a su paso por Toledo se han situado el 73,8 % del tiempo por encima del valor máximo permitido (1 mg/l), y el 63,5 % por encima del doble del mismo, hasta llegar a registrar un valor máximo de 50 mg/l, cincuenta veces superior a lo permitido. Es importante señalar que estas cantidades, siendo extremadamente altas y preocupantes, son menores que en la desembocadura del Jarama en el Tajo, donde el 89,2 % del tiempo se superó el máximo permitido fijado en 0,6 mg/l, y el 84,2 % del doble el doble de lo permitido. Sin embargo, el máximo al que se llegó en el Jarama (39,2 mg/l) es inferior al alcanzado en Toledo. Cabe señalar que estas conclusiones pueden ser incompletas, ya que la serie está cortada en 50 mg/l debido a que, según ha sido comunicado por la CHT, los aparatos medidores no están diseñados para registrar valores superiores a este valor. En el caso de los fosfatos nos encontramos ante un escenario parecido: el 74,0 % del tiempo en Safont se ha incumplido la normativa vigente y el 34,6 % se ha superado el doble del máximo legal permitido (0,4 mg/l), hasta alcanzar máximos de 10 mg/l, veinticinco veces por encima del máximo legal. En el Jarama estas mismas cifras se encuentran en el 76,9 % del tiempo de incumplimiento de la legislación y el 46,3 % del tiempo que se ha sobrepasado el doble de lo máximo permitido, llegándose a registrar un máximo de 10 mg/l, tras observarse un claro corte de la serie, como en el caso anterior.

Las causas de la presencia de espumas en esta investigación se han buscado analizando la correlación entre las series en la estación de Puente Largo (Jarama antes de su desembocadura) y en Safont (Tajo en Toledo) de una serie de características fisicoquímicas: temperatura del agua, caudal, pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto, amonio, fosfatos y nitratos.

En los episodios de espumas, la hipótesis de que, a mayor caudal, se prevé mayor agitación del agua y, por tanto, mayor cantidad de espumas, no ha sido verificada: el caudal, en este caso concreto, no guarda relación con la generación de espumas.

Las espumas aparecen, mayoritariamente, en los meses de octubre a febrero, por lo que se estudió la influencia de la temperatura en su aparición. Se observó que, en los meses más fríos del año, y dentro de ellos, los días más fríos de los que se han identificado con presencia de espumas, el pH del agua, la turbidez y la concentración de oxígeno eran más bajas, mientras



que la concentración de amonio y nitratos era más alta. Este descenso del oxígeno sería compatible con la alta concentración de amonio aguas arriba y su consumo de oxígeno en el proceso de nitrificación. Sin embargo, con los datos disponibles, no puede deducirse causalidad entre los distintos factores. Atendiendo a las medias, no puede afirmarse que los episodios de espumas coincidan con momentos de temperaturas más bajas. Esto sí podría afirmarse atendiendo a las medianas, no pareciendo importante, no obstante, la diferencia de 1,3º entre la temperatura del agua de la serie completa y de la serie de episodios de espumas desde un punto de vista ambiental. El oxígeno sí es significativamente más bajo durante los episodios de espumas, situándose solo ligeramente por encima del valor de cambio de estado a peor que bueno por término medio en esos días.

Los datos medios y medianos de amonio y fosfatos durante los días con espumas son significativamente más altos, desde un punto de vista estadístico, que los de la serie completa. Estas conclusiones son potentes, debido a que al no haberse podido documentar como días con espumas todos en los que dichas espumas han estado presentes, si de la serie completa hubieran podido ser eliminados todos los episodios con espumas, los contrastes estadísticos realizados apuntarían en el mismo sentido siendo mayor la diferencia de medias y medianas, si cabe.

El estudio establece una importante relación entre las concentraciones de amonio y fosfatos en los días con episodios de espumas en la estación de Safont, ya que el 95,83 % de los días con espumas al menos uno de los dos parámetros se encontraba por encima del límite de buen estado, estando el 83,33 % de los días entre el 25 % de los días con concentración de contaminantes más alta. Esta relación se encuentra limitada únicamente por la falta de datos. Así, las altas concentraciones de estos dos parámetros pueden estar relacionadas con los episodios de espuma del río Tajo a su paso por Toledo.

En los episodios de espumas analizados existe, además, una alta coincidencia de valores altos en las concentraciones de amonio en Puente Largo (río Jarama) y en Safont (río Tajo en Toledo) lo que permite concluir la alta incidencia de las concentraciones de amonio del río Jarama en el río Tajo en Toledo durante los episodios de espumas, existiendo a su vez otras fuentes intermedias. Sin embargo, en el caso de los fosfatos esta coincidencia no es inequívoca: los días que se han detectado espumas y el río Tajo a su paso por Toledo tenía concentraciones elevadas de fosfatos, mayoritariamente éstos no provenían del río Jarama, sino de fuentes intermedias. Esto nos lleva a reafirmarnos en la presencia de fuentes puntuales, así como contaminación difusa, entre el río Jarama y Toledo que contribuyen a los altos niveles de fosfatos.

Los valores elevados de amonio y fosfatos parecen apuntar a un origen mayoritariamente urbano de los nutrientes, lo que encajaría con la gran cantidad de vertidos de aguas residuales que llevan tanto el Jarama como el Tajo en el tramo de estudio. Los vertidos urbanos suelen contener tensoactivos que son los responsables directos de la generación de espumas. Por ello, la conclusión más probable es que los valores elevados de amonio y fosfatos en los episodios de espumas se deban a contaminación urbana. No obstante, sería necesario contar con datos de presencia de tensoactivos en agua, con el fin de confirmar de forma definitiva el origen urbano o industrial de dicha contaminación.



En esta investigación ha quedado patente la altísima concentración de contaminantes presente en el río Tajo en su tramo medio. En este escenario, puede deducirse que cualquier descarga puntual de tensoactivos puede ser causa de las espumas al concurrir con los azudes que provocan agitación del agua.

En el estudio realizado, se detectan algunas limitaciones principalmente derivadas de la calidad de los datos oficiales disponibles sobre los indicadores fisicoquímicos del río. La red CEMAS ofrece una idea del estado general de las masas de agua en un punto concreto, pero no permite hacer un análisis espaciotemporal consistente, debido a que las muestras no han sido tomadas en las mismas fechas ni con la misma periodicidad y son insuficientes. La red SAICA, aunque ofrece datos prácticamente en continuo (quinceminutales) de parámetros fisicoquímicos, tiene deficiencias en cuanto a la ausencia de mediciones de amonio, fosfatos y nitratos en muchas estaciones y durante largos periodos de tiempo. Además, la distribución de datos de cada uno de los componentes en las redes de información disponibles es muy variable, faltando gran cantidad de ellos a lo largo de días, meses e incluso años completos. Por último, ofrece fallos en la medición de la temperatura, conductividad y el pH, con valores en 0, y valores truncados por motivos técnicos (según comunicación de la CHT) para oxígeno, amonio, fosfatos y nitratos. Para futuros estudios de la calidad de las aguas sería necesario contar con datos oficiales completos y más fiables en toda la red de control.

El amonio y los fosfatos han sido considerados indicadores indirectos de la presencia de los tensoactivos generadores de espumas en el agua: el primero porque ante la presencia de grandes vertidos urbanos se deduce la presencia de tensoactivos procedentes de geles, detergentes y otros de origen industrial; y en el caso de los fosfatos, porque la mayor parte de los detergentes siguen conteniendo, además de tensoactivos, fosfatos en su elaboración. Sin embargo, dado que existe la posibilidad de que haya vertidos directos de tensoactivos, además de los incluidos de manera indirecta en detergentes, sería conveniente hacer nuevos estudios en continuo para corroborar la correlación hipotetizada, así como llevar a cabo el análisis de los datos disponibles, pero no publicados por la CHT de tensoactivos.

Además, debido a la metodología de recogida de información en cuanto a la aparición de episodios de espumas, en la que las fuentes documentales no han sido tan precisas como hubiera sido deseable en el registro de estos eventos, han existido episodios de espumas que no han sido detectados y se han perdido para el análisis. La generación de espumas en el río Tajo a su paso por Toledo es un hecho frecuente y habitual, por lo que enseguida deja de tener impacto mediático inmediato en los medios de comunicación. En consecuencia, numerosos episodios no han podido ser incluidos en este estudio. Se propone avanzar en la teledetección vía satélite como procedimiento para disponer de práctica totalidad de los días con presencia de espumas.

Un elemento que no se ha podido analizar con los datos disponibles es la incidencia de la contaminación difusa en las concentraciones ascendentes de nitratos. Las concentraciones de nitratos en Toledo son superiores a las del río Tajo tras la incorporación del río Jarama en Aranjuez, lo que indica que los altos niveles en Toledo pueden deberse a fuentes ajenas a los aportes del río Jarama, así como al proceso de nitrificación del amonio. No obstante, la información relativa a la concentración de nitratos no está disponible en la mayor parte de los episodios de espumas, por lo que no se han podido extraer conclusiones válidas.



Dados los altos niveles de amonio, fosfatos y nitratos que se detectan, como línea de investigación futura se plantea valorar la incidencia de los desbordamientos y aliviaderos de la red de alcantarillado en momentos puntuales de lluvia, así como de la contaminación difusa procedente de la agricultura.

A pesar de las limitaciones contempladas, este trabajo ha podido establecer una asociación entre los episodios de espumas en el Tajo a su paso por Toledo y su alto grado de contaminación. Se ha demostrado que los días en los que se ha registrado la presencia de espuma había, por término medio, mayor concentración de amonio y fosfatos en el agua del río Tajo que en el conjunto de la serie. La contaminación que procede del Jarama, junto con las aportaciones de amonio y fosfatos entre la desembocadura de este en el Tajo (Aranjuez) y Toledo están asociados a los episodios de espumas. Los vertidos son, mayoritariamente, de origen urbano lo que está asociado a la presencia de tensioactivos, que son los responsables directos de la generación de espumas en situación de turbulencia creada por los azudes de la ciudad, y que se han inferido a través de los elevados valores de amonio y fosfatos.

5. Referencias

- Aguilar, M., Bleda, J. M., Larraz, B., & Urquiaga, R. (2024). The Collective Memory of the Fluvial Environment: The Loss of a Healthy Natural Environment in the City of Toledo (Spain) through Pollution. *Society & Natural Resources*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/08941920.2024.2310219>
- Arango, R. (08/02/2018). El río Tajo, una vez más, vuelve a pasar por Toledo lleno de mierda. *En Castilla-La Mancha*. https://www.encastillalamancha.es/sociedad-cat/rio-tajo-una-vez-mas-vuelve-pasar-toledo-lleno-mierda/#slideimg_1
- Arauzo, M., Martínez-Bastida, J. J., & De Valladolid, M. (2008). Contaminación por nitrógeno en el sistema "río-acuífero aluvial" de la cuenca del Jarama (Comunidad de Madrid, España) ¿Origen agrícola o urbano? *Limnetica*, 27(2), 195-210. <https://doi.org/10.23818/limn.27.16>
- Arenas-Sánchez, A., Rico, A., Rivas-Tabares, D., Blanco, A., García-Doncel, P., Romero-Salas, A., Nozal, L., & Vighi, M. (2019). Identification of contaminants of concern in the upper Tagus river basin (central Spain). Part 2: Spatio-temporal analysis and ecological risk assessment. *Science Of The Total Environment*, 667, 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.286>
- Bätje, M., & Michaelis, H. (1986). Phaeocystis pouchetii blooms in the East Frisian coastal waters (German Bight, North Sea). *Marine Biology*, 93(1), 21-27. <https://doi.org/10.1007/bf00428651>
- Boletín Oficial del Estado, BOE (1986). Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Referencia: BOE-A-1986-10638
- Boletín Oficial del Estado, BOE (2008). Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE, núm. 229, de 22 de septiembre de 2008, páginas 38472 a 38582. Referencia: BOE-A-2008-15340
- Boletín Oficial del Estado, BOE (2015). Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. BOE núm. 219, de 12 de septiembre de 2015, 80582 - 80677
- Boletín Oficial del Estado, BOE (2023). Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. BOE» núm. 9, de 11 de enero de 2023, páginas 4253 a 4354 (102 págs.). Referencia: BOE-A-2023-628.
- Bolinches, A. (2019, 7 de mayo). Efluentes de depuración y afección al medio receptor: El caso del Tajo Medio [Presentación de contenido]. Jornada de debate sobre depuración de aguas residuales. Observatorio del Agua de la Fundación Botín. Madrid. https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed_uploads/Observatorio%20Tendencias/Sem%20NACIONALES/mayo2019jornadadepuracion/S1P1Bolinches.pdf



- Bolinches, A., De Stefano, L. & Paredes-Arquiola, J. (2020). Adjusting wastewater treatment effluent standards to protect the receiving waters: the case of low-flow rivers in central Spain. *Environmental Earth Sciences*, 79(19). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09184-z>
- Brown, M. B. & Forsythe, A. b. (1974) The Small Sample Behavior of Some Statistics Which Test the Equality of Several Means, *Technometrics*, 16:1, 129-132. <http://dx.doi.org/10.1080/00401706.1974.10489158>
- Camiñas, T. (13 de septiembre de 1989). El Tajo se ha convertido en una cloaca. *El País*. https://elpais.com/diario/1989/09/13/sociedad/621640802_850215.html
- Cátedra del Tajo UCLM-Soliss (2023). Visor de presiones de los ríos de la cuenca del Tajo. www.catedradeltajovisor.org
- Comunidad de Madrid. (2021) Diagnóstico medioambiental 2020. CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO
- CHT (2020). Esquema de Temas Importantes de la parte española de la demarcación hidrográfica del Tajo. Tercer ciclo de planificación hidrológica. Confederación Hidrográfica del Tajo. https://www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/PlanHidrologico/Planif_2021-2027/Documents/PHTAJO3_ETI_12-2020.pdf
- CHT (2021). Censo de vertidos de la parte española de la demarcación hidrográfica del Tajo. Confederación Hidrográfica del Tajo. <http://www.chtajo.es/LaCuenca/CalidadAgua/ControlVertidos/Paginas/default.aspx>
- CHT (2022a). Red de Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales (CEMAS). Confederación Hidrográfica del Tajo. https://www.chtajo.es/LaCuenca/CalidadAgua/Resultados_Informes/Paginas/RISupFisicoQu%C3%ADmico.aspx
- CHT (2022b). Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA). Confederación Hidrográfica del Tajo. <https://saicaweb.chtajo.es/saica/index.php>
- Corral, M. C. (16 de octubre de 2016). El Tajo, cubierto de espuma blanca a su paso por Toledo. *El Mundo*. <https://www.elmundo.es/ciencia/2016/10/16/5803717122601dc41b8b45dd.html>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2019). Anuario de aforos. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico y Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-cdr_datos.asp?gr_cuenca_id=3
- De Juan, R. (21/01/2018). Una pesadilla: el Tajo a su paso por Toledo lleva más suciedad que nunca. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamancha.es/castilla-la-mancha-cat/toledo/una-pesadilla-el-tajo-a-su-paso-por-toledo-hoy-domingo-lleva-mas-suciedad-que-nunca/>
- De Lucas, A. (2019). Concepto, análisis histórico y determinación de excedentes de la cuenca del tajo: aplicación al trasvase Tajo-Segura [Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares]. <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=wk%2FDE0VTAKo%3D>
- Del Río, C. (31/12/2017). El Tajo a su paso por Toledo despide 2017 como lo comenzó, lleno de mierda. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamancha.es/castilla-la-mancha-cat/toledo/el-tajo-a-su-paso-por-toledo-despide-2017-como-lo-comenzo-lleno-de-mierda/>
- Diario Oficial de la Comunidad Europea, DOCE (2000). 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. «DOCE» núm. 327, de 22 de diciembre de 2000, páginas 1 a 73 (73 págs.). DOUE-L-2000-82524
- Diario Oficial de la Unión Europea, DOUE (2004). Reglamento (CE) No 648/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 31 de marzo de 2004 sobre detergentes. «DOCE» núm. L104, de 8 de abril de 2004, páginas 1 a 35 (35 págs.). Document 32004R0648
- Diario Oficial de la Unión Europea, DOUE (2020). Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. «DOUE» núm. 177, de 5 de junio de 2020, páginas 32 a 55 (24 págs.). Referencia:DOUE-L-2020-80879
- Díez-Mayans, C., Bienes & Ramón. (2003). Evolución de la contaminación por nitratos, nitritos y amonio en los ríos Henares, Tajuña, Jarama y Tajo de la Comunidad de Madrid. Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria.
- Dirección General de Sanidad, DGS (1972). Circular número 48, de 19 de junio de 1972.



- Eberlein, K., Leal, M.T., Hammer, K.D. et al. Dissolved organic substances during a *Phaeocystis pouchetii* bloom in the German Bight (North Sea). *Mar. Biol.* 89, 311–316 (1985). <https://doi.org/10.1007/BF00393665>
- Enclm (22/10/2017). El río Tajo en Toledo, una macabra fiesta de la espuma. *En Castilla-La Mancha*. https://www.encastillalamanca.es/castilla-la-mancha-cat/rio-tajo-toledo-una-macabra-fiesta-la-espuma/#slideimg_1
- Enclm (10/02/2019). El video de las espumas que vuelven a ahogar al río Tajo a su paso por Toledo. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamanca.es/medio-ambiente-cat/el-video-de-las-espumas-que-vuelven-a-ahogar-al-rio-tajo-a-su-paso-por-toledo/>
- Efron, B., & Tibshirani, R.J. (1994). *An Introduction to the Bootstrap* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- Ettema, R., Johnson, J.K., Schaefer, J.A., 1989. Foam-initiated ice covers on small rivers and streams: an observation. *Cold Regions Science and Technology* 16, 95-99.
- Fisenko, A. I. (2004). A New Long-Term On Site Clean-Up Approach Applied to Non-Point Sources of Pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 156(1), 1-27. <https://doi.org/10.1023/b:wate.0000036822.97934.7b>
- Gallego, M.S. (2013). Los Señores del Tajo. En Larraz, B.; Cano, A. (coords.) *El río Tajo, Lecciones del pasado para un futuro mejor*, Toledo: Editorial Ledoria, p. 71-78.
- Glass, G. V., Peckham, P. D., & Sanders, J. R. (1972). Consequences of failure to meet assumptions underlying the fixed effects analyses of variance and covariance. *Review of Educational Research*, 42(3), 237–288. <https://doi.org/10.3102/00346543042003237>
- Gonzalo Garrigos [@GonzaloGarrigos] (23/02/2021). Así corren las aguas del río Tajo a su paso por #Toledo @AEMET_ClaMancha @EITiempoCMM @EITiempo_tve @EITiempoA3 @meteocr #BuenasTardes #FelizMartesATodos [Video Adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/GonzaloGarrigos/status/1364269243584372737?s=20>
- Instituto Nacional de Estadística-INE (2023). Cifras oficiales de población de los municipios españoles: Revisión del Padrón Municipal. España.
- Larraz, B., Hernandez-Mora, N., Gallego, M.S., San-Martín, E. (2015). La gestión insostenible del río Tajo. *BIBLIO 3W:: REVISTA BIBLIOGRÁFICA DE GEOGRAFÍA Y CIENCIAS SOCIALES*. 21. 742-98133.
- Larraz, B., Sánchez, M.A., Urquiaga, R., Alonso, C. (2023). Análisis del estado de conservación de la cuenca del río Guadarrama. Consecuencias en el municipio de Batres. Cátedra del Tajo UCLM-Soliss. Toledo. <https://drive.google.com/file/d/1Lq2Iemp59PNQDnqNu-Rk2Jz-doHeygyl/view>
- La Sexta (02/08/2017). Denuncian de nuevo la aparición de espuma en el Tajo a su paso por Toledo: "El río está prácticamente muerto". *La Sexta*. https://www.lasexta.com/noticias/sociedad/denuncian-nuevo-aparicion-espuma-tajo-paso-toledo-rio-esta-practicamente-muerto_201708025982336e0cf24fa98910ea86.html
- LaSexta (09/07/2018). Denuncian un nuevo vertido en el río Tajo, cubierto por una densa capa de espuma a su paso por Toledo. *La Sexta*. https://www.lasexta.com/noticias/sociedad/denuncian-un-nuevo-vertido-en-el-rio-tajo-cubierto-por-una-capa-de-espuma-a-su-paso-por-toledo_20161016580381f90cf26449f5dd2123.html
- Lix, L. M., Keselman, J. C., & Keselman, H. J. (1996). Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the One-Way analysis of variance F test. *Review of Educational Research*, 66(4), 579-619. <https://doi.org/10.3102/00346543066004579>
- Madrangé, L., Chaboury, P., Ferrandon, O., Mazet, M., Rodeaud, J., 1992. Study of the formation and stability of chemical foam on the Vienne River between Limoges and Confolens. *Revue des Sciences de L'eau* 6, 315-334.
- Manjavacas, M. (17 de febrero de 2022). El "drama" del río Tajo en Toledo: medio siglo de contaminación sin que cesen las espumas ni el trasvase. *Eldiario.es*. https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/drama-rio-tajo-toledo-medio-siglo-contaminacion-cesen-espumas-trasvase_1_8757836.html
- Martín, A. (18/01/2018). El Ayuntamiento de Toledo presenta cuatro recursos contra la Confederación Hidrográfica del Tajo. *SER-Toledo*. https://cadenaser.com/emisora/2018/01/18/ser_toledo/1516275364_865671.html
- Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. (2021). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas*. Madrid.



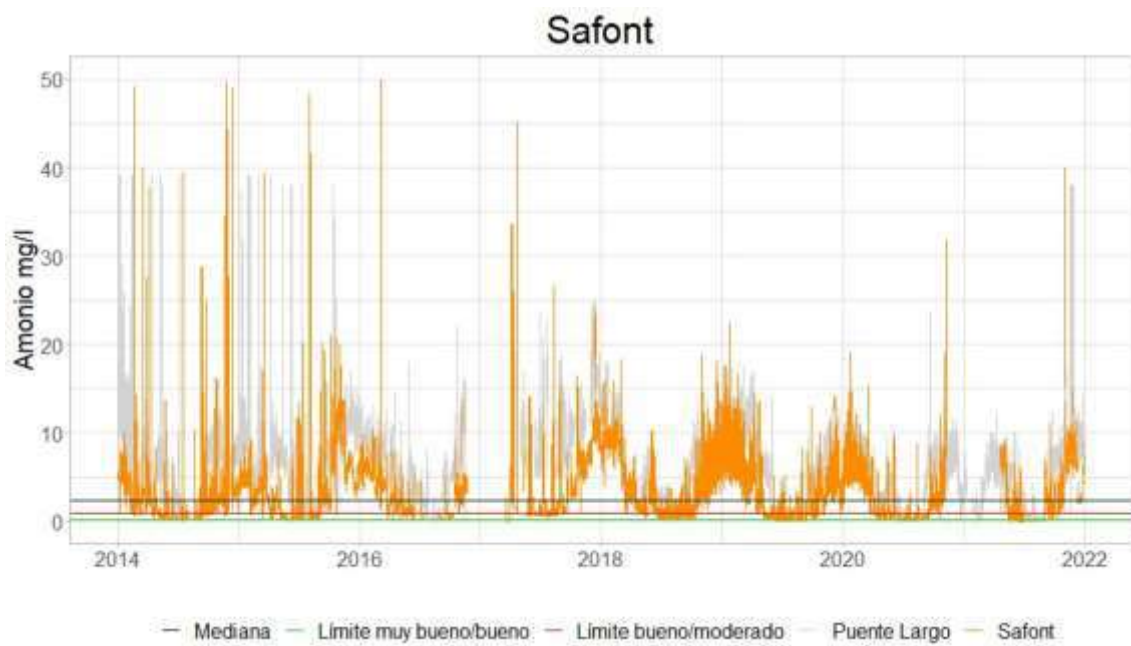
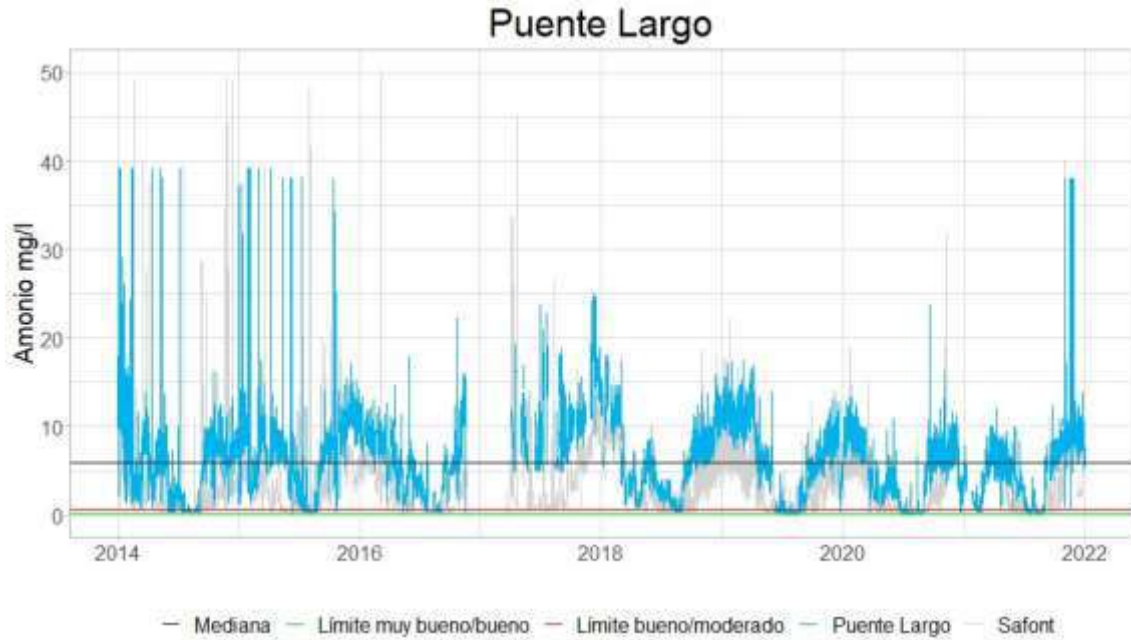
- Morlanes, A. (25/10/2021). Nuevo episodio de espumas en las aguas del río Tajo a su paso por Toledo: "Brutal". *El Español-Digital Castilla-La Mancha*. https://www.elespanol.com/eldigitalcastillalamancha/region/toledo/20211025/nuevo-episodio-espumas-aguas-tajo-toledo-brutal/622187942_0.html
- Muñoz J.V. (31/10/2016). Así baja el Tajo por Toledo en el punto donde más espumas se generan. SER Toledo. https://cadenaser.com/emisora/2016/10/31/videos/1477894511_285712.html
- Noticias CMM. (04/03/2018). #TAJO | Espumas abundantes en el río Tajo a su paso por #Toledo. Contaminación patente, a pesar de las lluvias. [Vídeo adjunto]. Facebook. <https://www.facebook.com/watch/?v=582068338813999>
- Napolitano, G. E., & Richmond, J. E. (1995). Enrichment of biogenic lipids, hydrocarbons and PCBs in stream-surface foams. *Environmental Toxicology And Chemistry*, 14(2), 197-201. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140203>
- Patrimonio Toledo *Cuando es una rutina, día tras día... #Espumas en el paso del #Tajo por #Toledo. Aguas color chocolate. Depuradoras, NO* [Vídeo adjunto]. Twitter. https://twitter.com/Patrimon_Toledo/status/1387730253188157440?s=20
- Pojasek, R.B., Zajicek, O.T., 1978. Surface microlayers and foams source and metal transport in aquatic systems. *Water Research* 12, 7-10.
- Rafael Camarillo [@RafaCamarilloQ] (23/06/2021). Precioso timelapse del Puente de San Martín en Toledo, a pesar de las ya habituales espumas en el Tajo [Vídeo adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/RafaCamarilloQ/status/1407795622971949058?s=20>
- Raposo, A.A. & Barros, Luiz & Magalhães Júnior, Antônio. (2010). O uso de taxas de turbidez da bacia do Alto Rio das Velhas - Quadrilátero Ferrífero/MG - como indicador de pressões humanas e erosão acelerada. *Revista de Geografia*. 3. 31-45.
- Río Tajo Vivo [@rioTajoVIVO]. (25/01/2018) Las espumas en el Tajo vuelven a inundar la postal de #Toledo Y la CH Tajo dice que mejora la. [video adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/rioTajoVIVO/status/956468298413207553?s=20>
- Río Tajo Vivo [@rioTajoVIVO]. (03/03/2018) El Tajo en Toledo hoy presenta una postal de nuevo vergonzosa, con más espumas de lo habitual Contaminación que fluye, que. [video adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/rioTajoVIVO/status/969971488601399296?s=20>
- Ríos Ruiz, F., 2014. Comportamiento ambiental de tensioactivos comerciales: Biodegradabilidad, toxicidad y ozonización [Tesis doctoral]. Universidad de Granada. [<http://hdl.handle.net/10481/42048>]
- Rodríguez, D. (09/12/2016). Otra vez las espumas blancas en el Tajo a su paso por Toledo. *Ser Toledo*. https://cadenaser.com/emisora/2016/12/09/ser_toledo/1481282491_538933.html
- Romero, D. (06/12/2017). El Tajo en Toledo el Día de la Constitución: lleno de mierda y espumas como de costumbre. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamancha.es/castilla-la-mancha-cat/toledo/el-tajo-en-toledo-en-el-dia-de-la-constitucion-lleno-de-mierda-y-espumas-como-de-costumbre/>
- Ruzicka, K., Gabriel, O., Bletterie, U., Winkler, S., Zessner, M., 2009. Cause and effect relationship between foam formation and treated wastewater effluents in a transboundary river. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34, 565.
- Sánchez, E. (2022) Blog Toledo Olvidado. <https://toleodolvidado.blogspot.com/>
- San-Martín, E, Larraz, B., & Gallego, M. S. C. (2020). When the river does not naturally flow: a case study of unsustainable management in the Tagus River (Spain). *Water International*, 45(3), 189-221. <https://doi.org/10.1080/02508060.2020.1753395>
- Seuront, L., Vincent, D., & Mitchell, J. G. (2006). Biologically induced modification of seawater viscosity in the Eastern English Channel during a *Phaeocystis globosa* spring bloom. *Journal Of Marine Systems*, 61(3-4), 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.04.010>
- Schilling, K., & Zessner, M. (2011). Foam in the aquatic environment. *Water Research*, 45(15), 4355-4366. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.004>
- Toledodiario (29/11/2018). Denuncian la aparición de "gran cantidad" de espumas en el Tajo. *Toledodiario*. <https://toledodiario.es/denuncian-la-aparicion-de-gran-cantidad-de-espumas-en-el-tajo-debajo-de-la-presa-de-castejon/>
- Toletho [@ForoToletho] (24/03/2021). Lamentablemente estado del #riotajo hoy 24/04/21 en un año de abundantes nieves. #tajo @rioTajoVIVO @plataforma_tajo @Toledo_Olvidado [Vídeo adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/ForoToletho/status/1374780369115963392?s=20>



- Urquiaga, R. (2013), El río Jarama: un afluente al que tributa el río Tajo. En Larraz, B. y Cano, A (Coord.). El río Tajo, lecciones del pasado para un futuro mejor (pp. 91-122). Editorial Ledoria - Jesús Muñoz Romero.
- Valcárcel, Y., Alonso, S. G., Rodríguez-Gil, J. L., Castaño, A., Montero, J. C., Criado-Álvarez, J., Mirón, I., & Catalá, M. (2012). Seasonal variation of pharmaceutically active compounds in surface (Tagus River) and tap water (Central Spain). *Environmental Science And Pollution Research*, 20(3), 1396-1412. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1099-2>
- Verdugo, J. (09/12/2017). El nada inmaculado Tajo y las manchas espumosas despiertan la curiosidad de los turistas. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamanca.es/castilla-la-mancha-cat/toledo/el-nada-inmaculado-tajo-y-las-manchas-espumosas-despiertan-la-curiosidad-de-los-turistas/>
- Verdugo, J. (23/03/2018). Julián Maeso nos lleva al Puente de San Martín con «la fiesta de la espuma”. *En Castilla-La Mancha*. <https://www.encastillalamanca.es/especiales-cat/julian-maeso-nos-lleva-al-puente-de-san-martin-con-la-fiesta-de-la-espuma/>
- Wegner, C., & Hamburger, M. (2002). Occurrence of Stable Foam in the Upper Rhine River Caused by Plant-Derived Surfactants. *Environmental Science & Technology*, 36(15), 3250-3256. <https://doi.org/10.1021/es025532p>
- Welch, B. L. (1951). On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*, 38(3/4), 330–336. <https://doi.org/10.2307/2332579>.

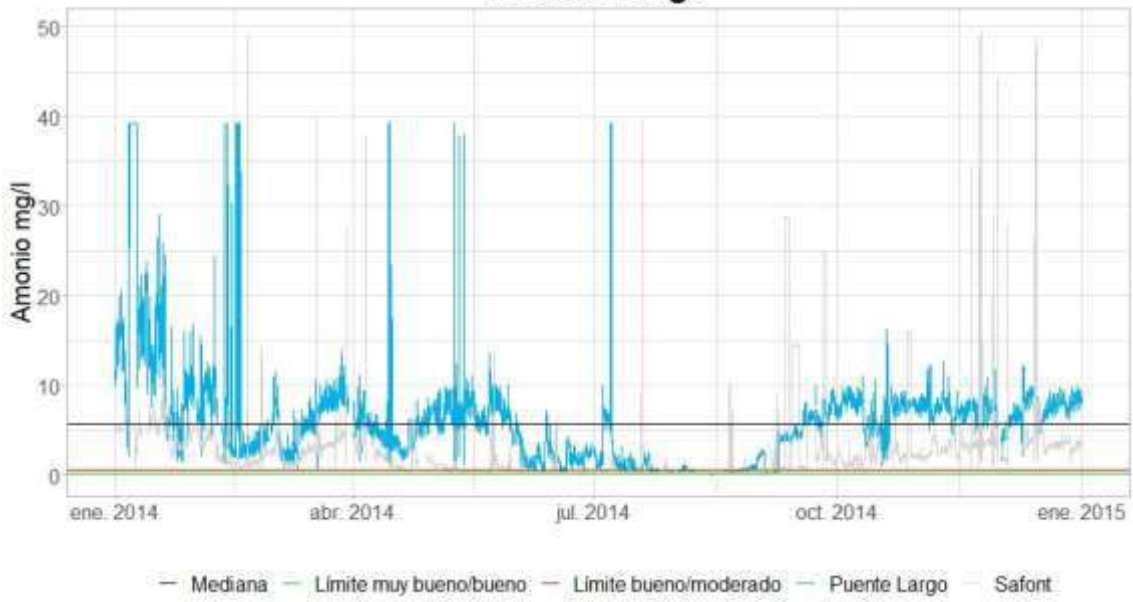


Anexo 1. Concentración de amonio y fosfatos en las estaciones de la red SAICA de Puente Largo (río Jarama antes de su desembocadura) y Safont (Toledo). Serie 2014-2021 y gráficas anuales.

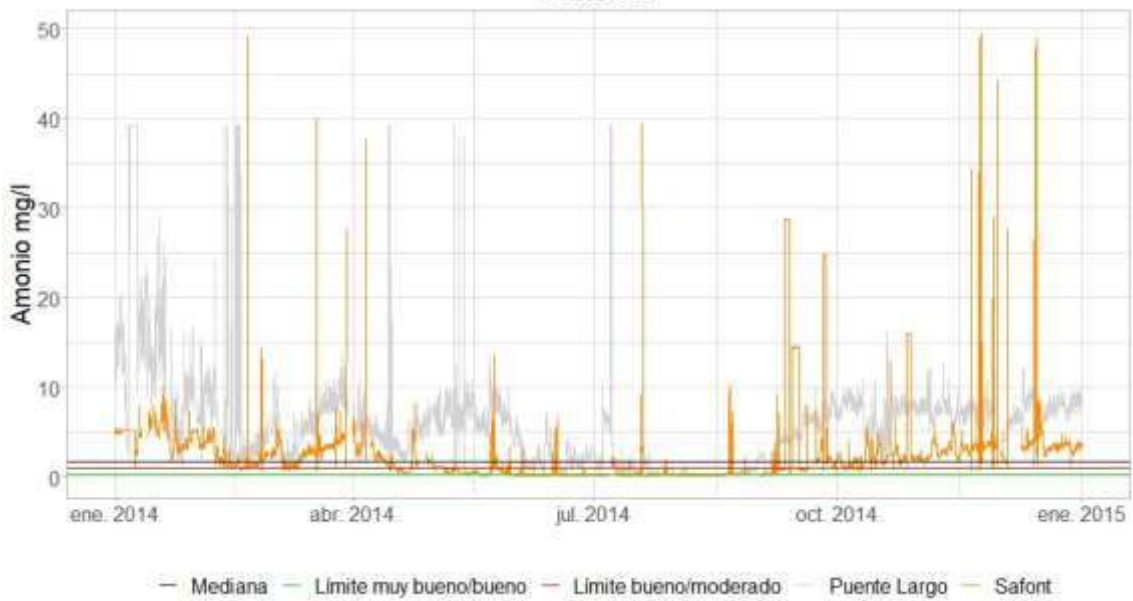




Puente Largo

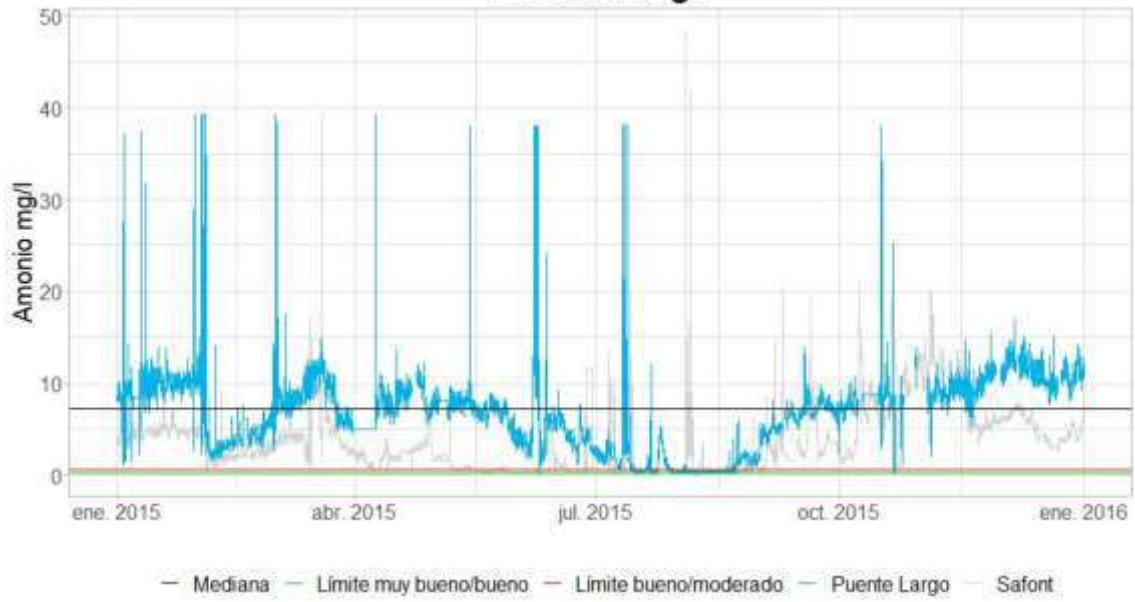


Safont

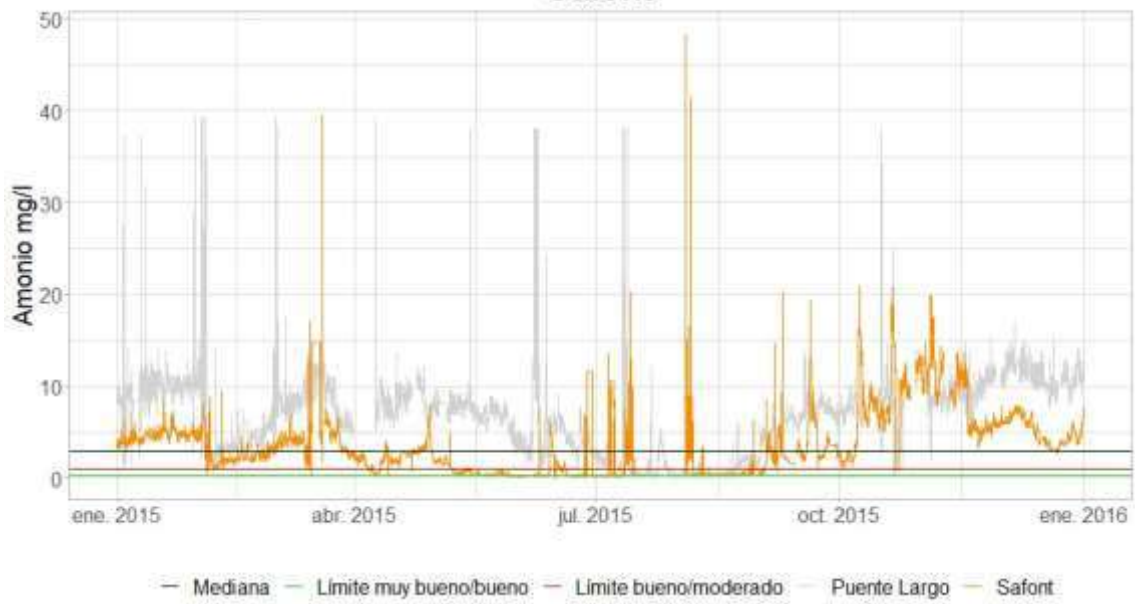




Puente Largo

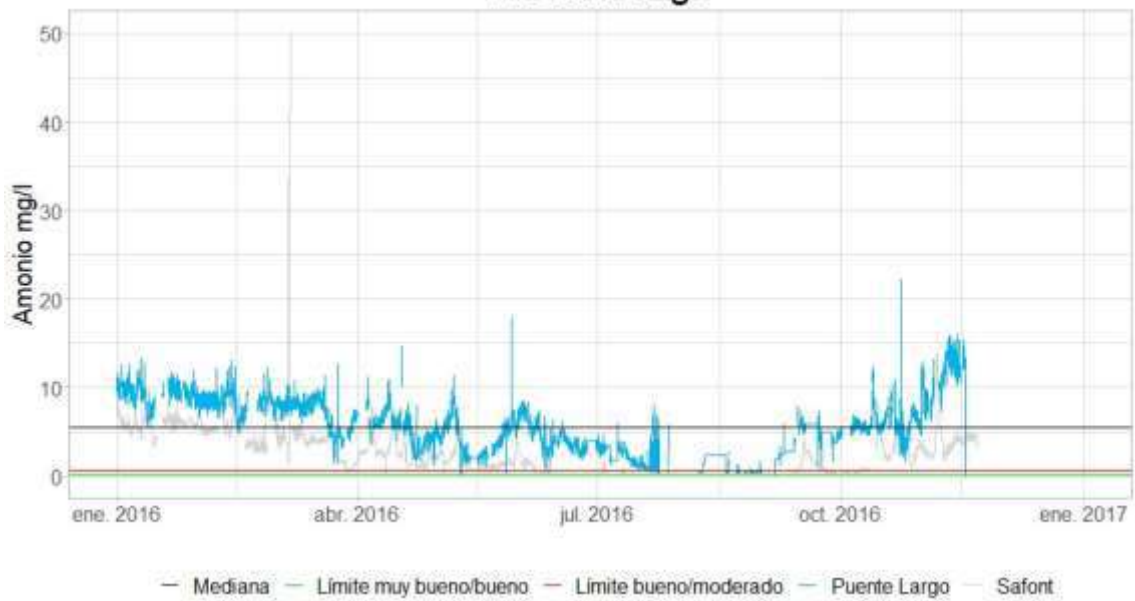


Safont

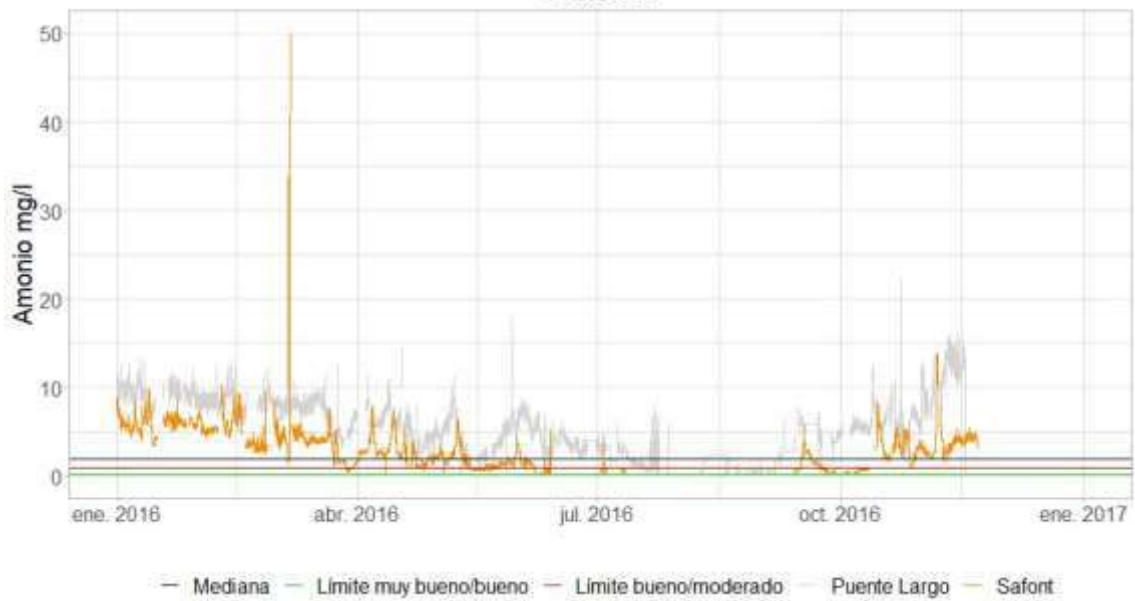




Puente Largo

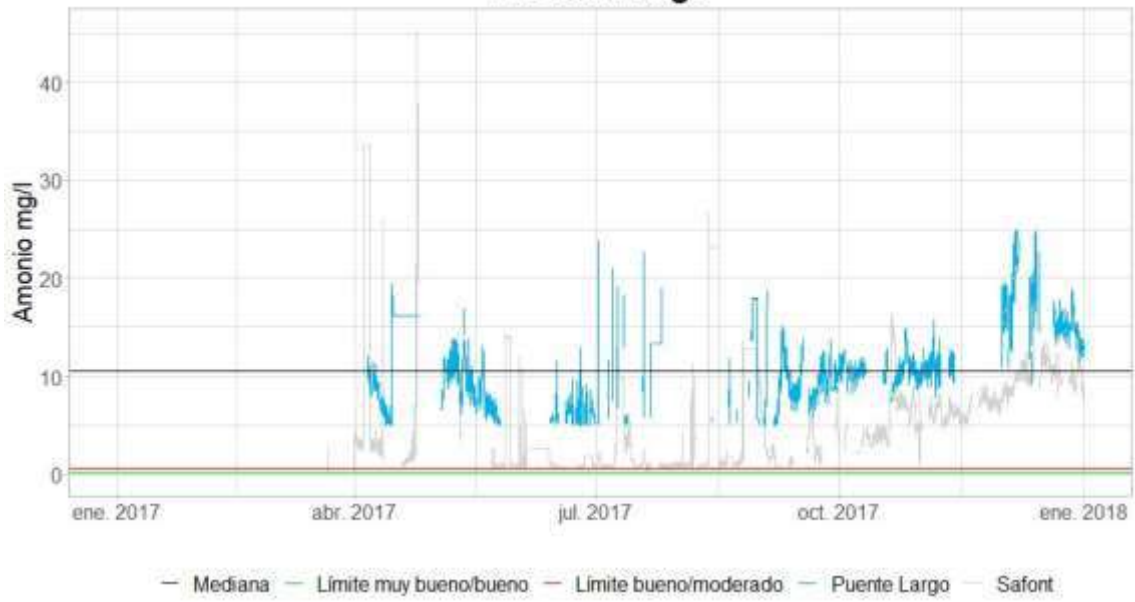


Safont

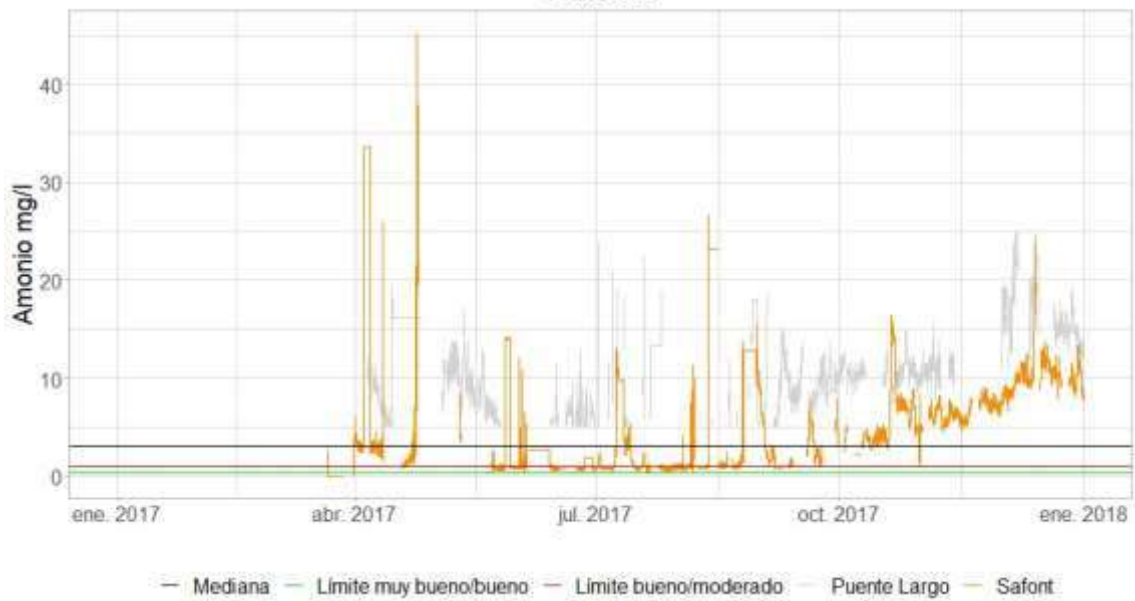




Puente Largo

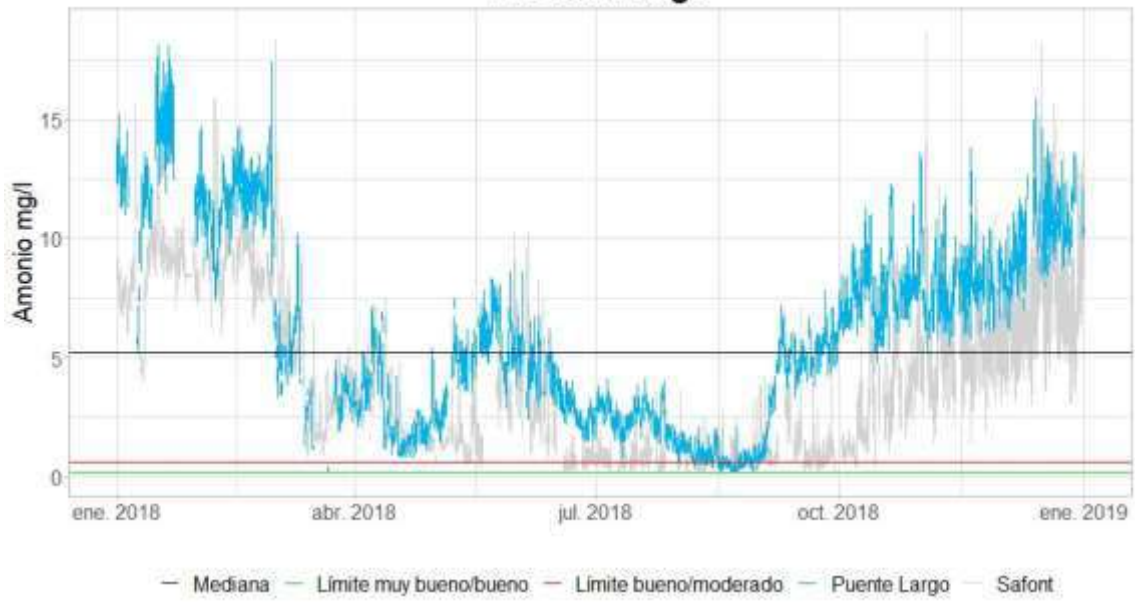


Safont

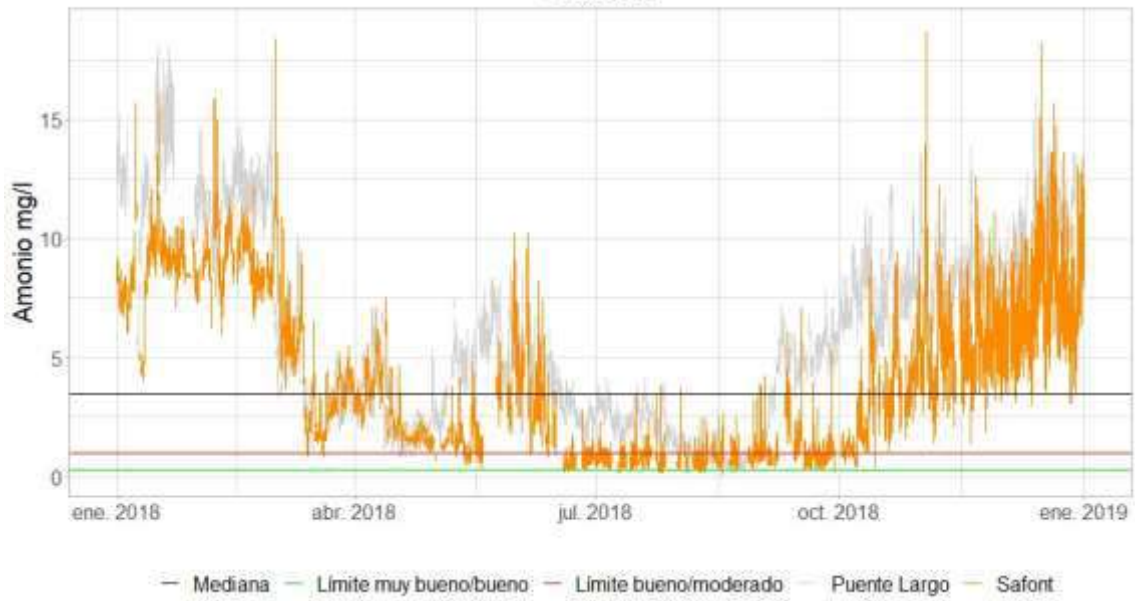




Puente Largo

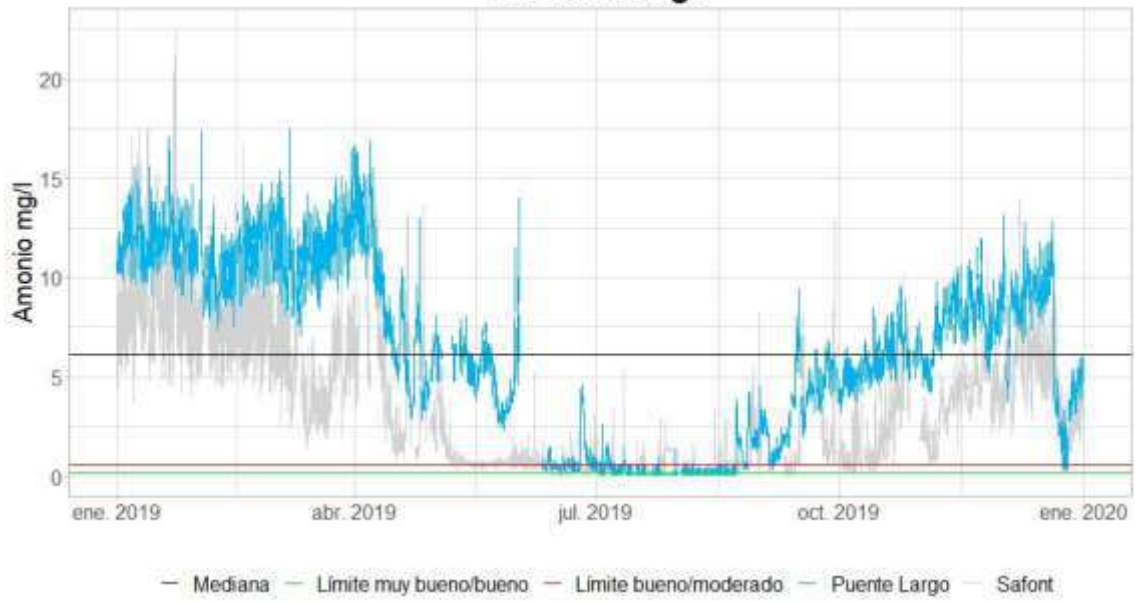


Safont

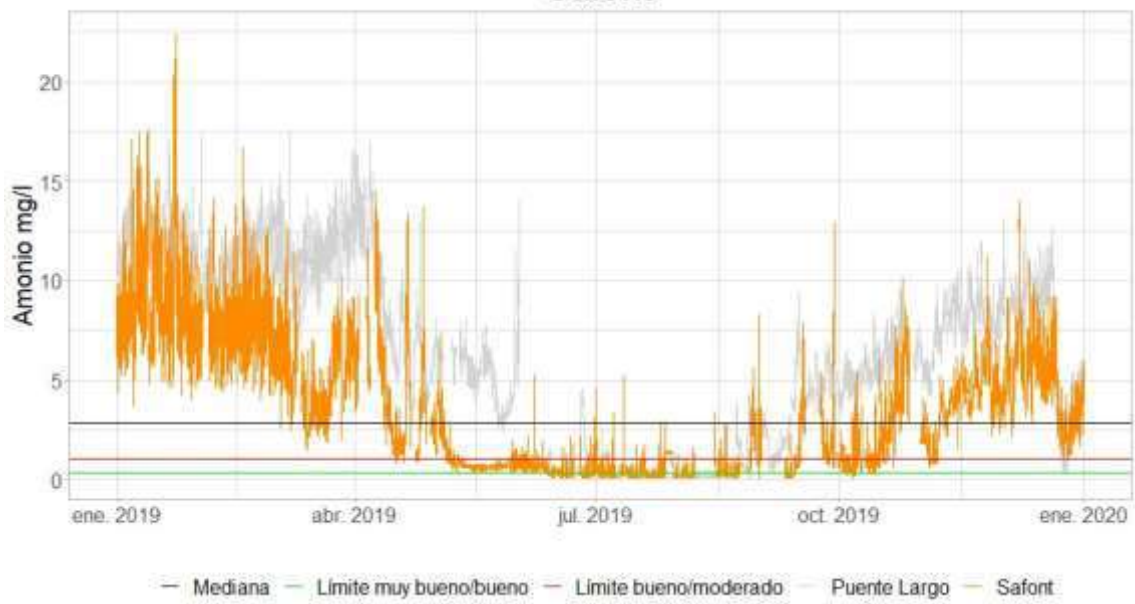




Puente Largo

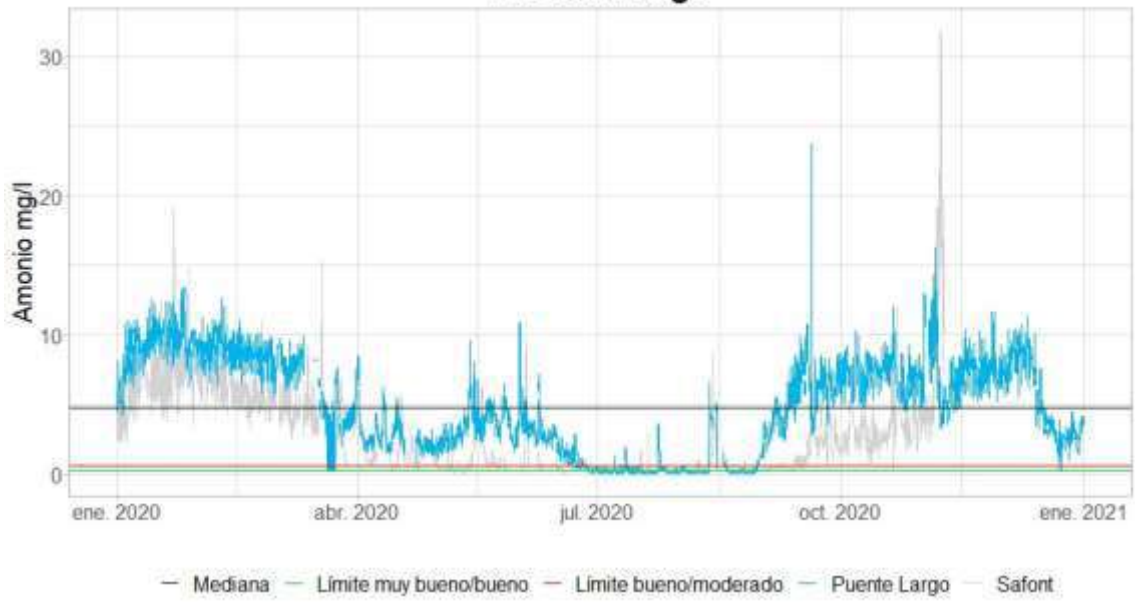


Safont

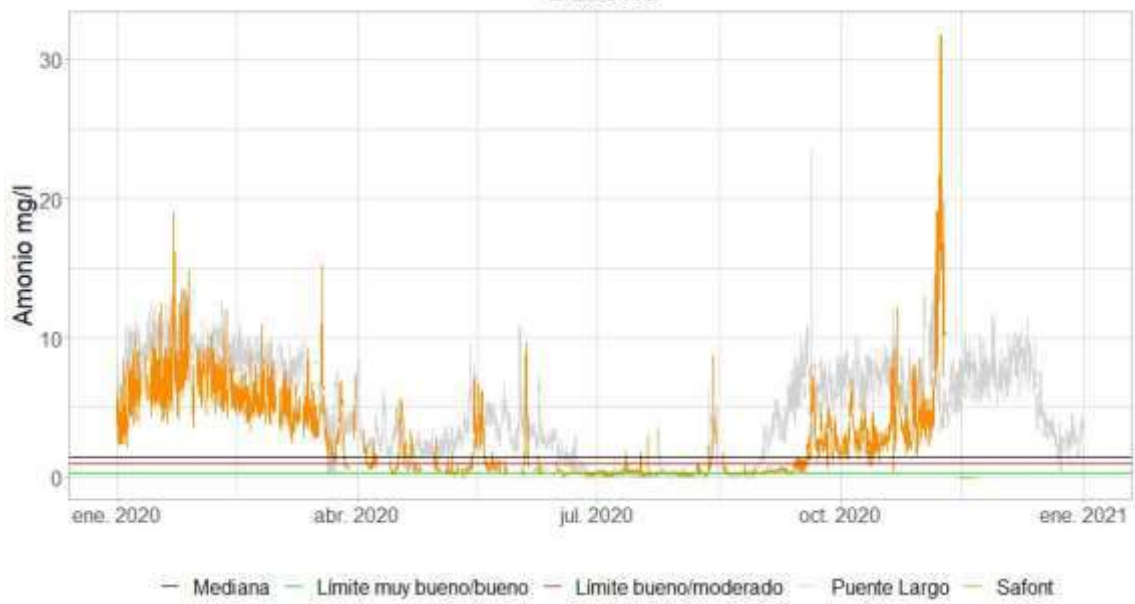




Puente Largo

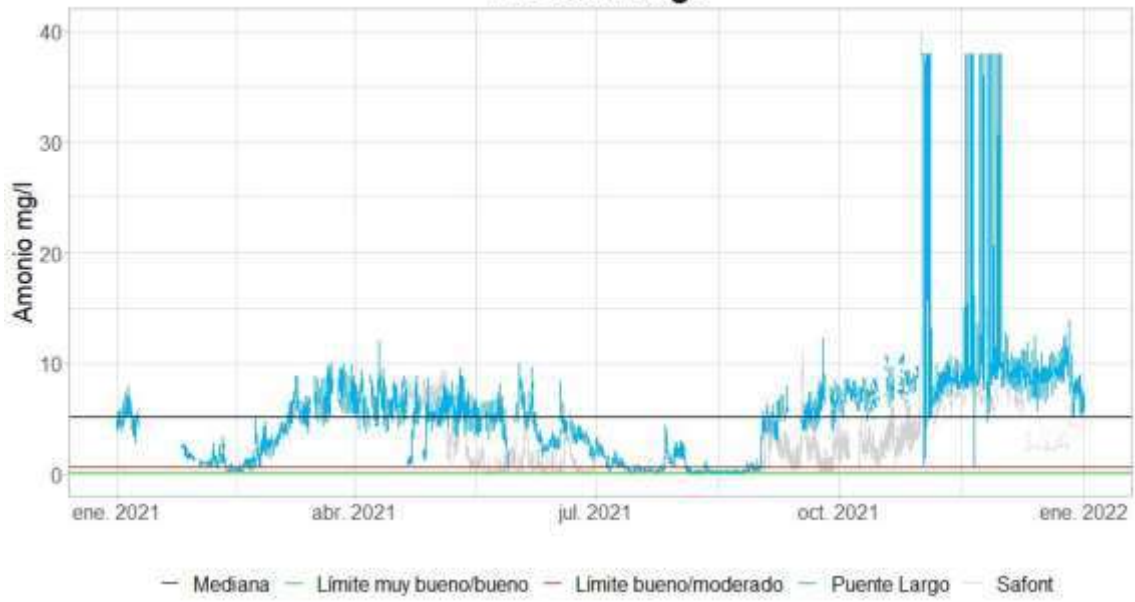


Safont

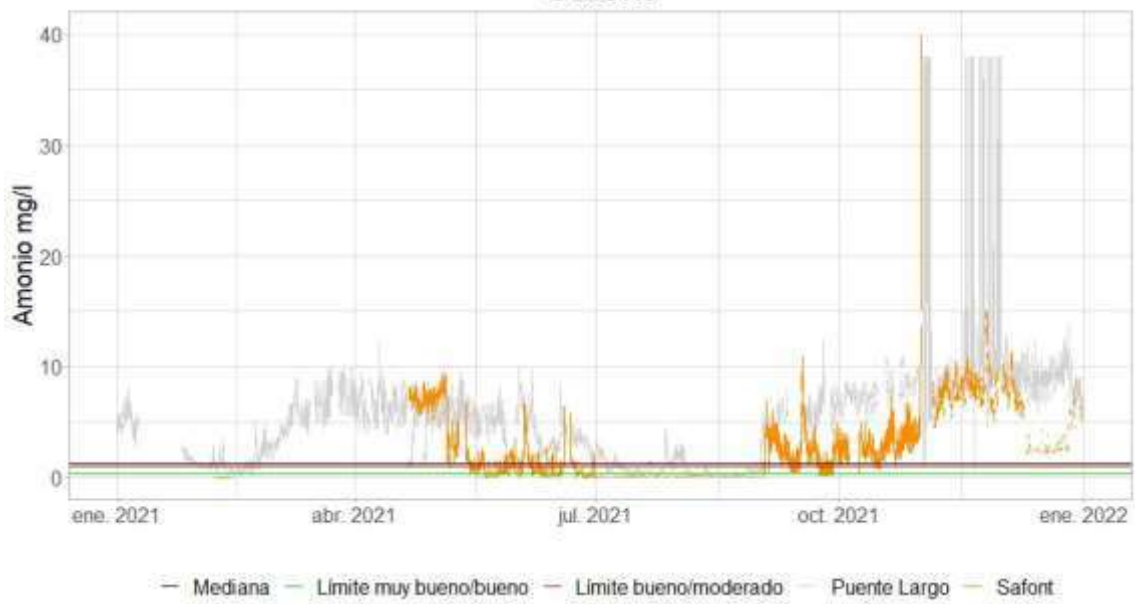




Puente Largo

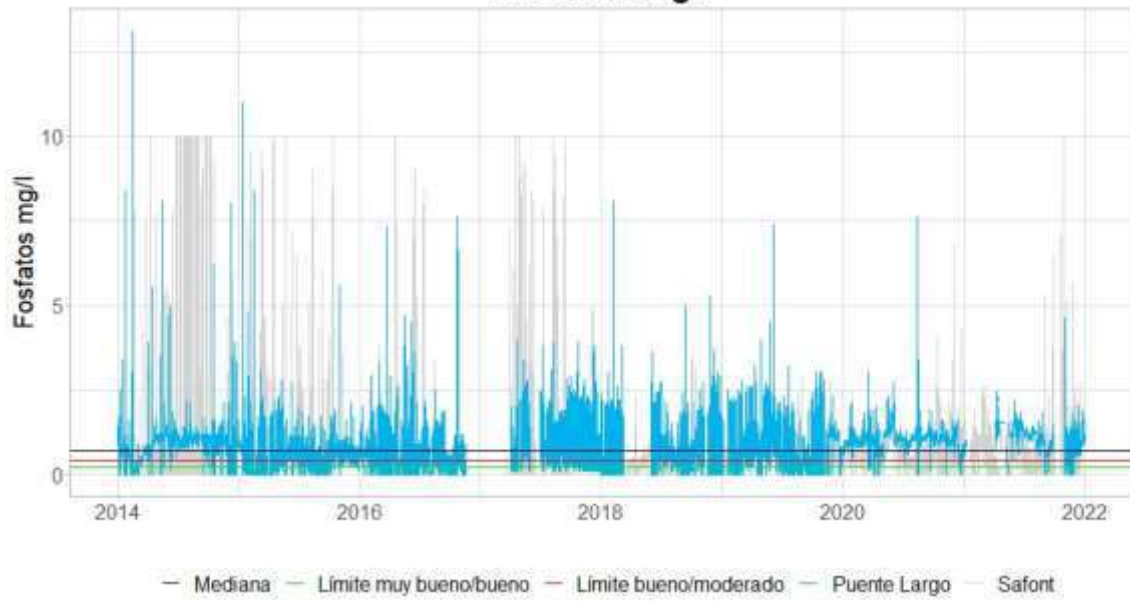


Safont

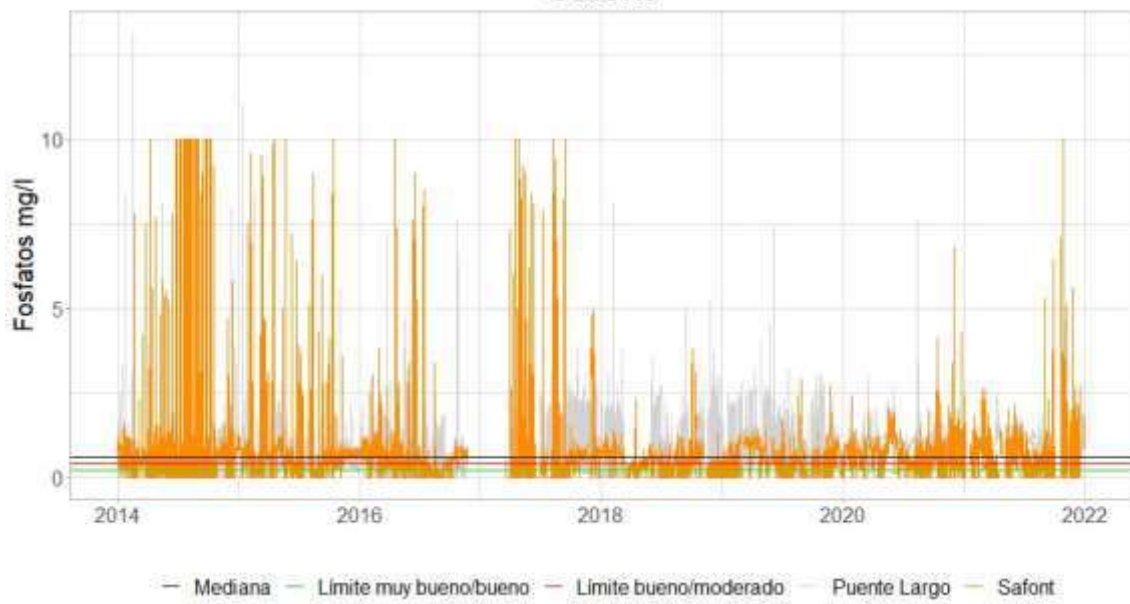




Puente Largo

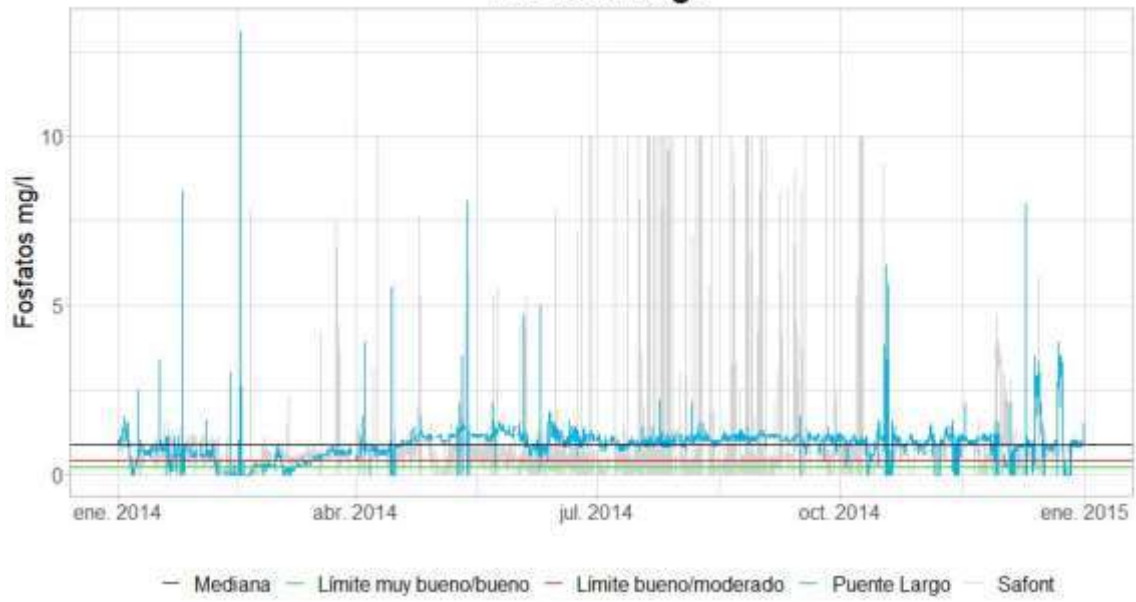


Safont

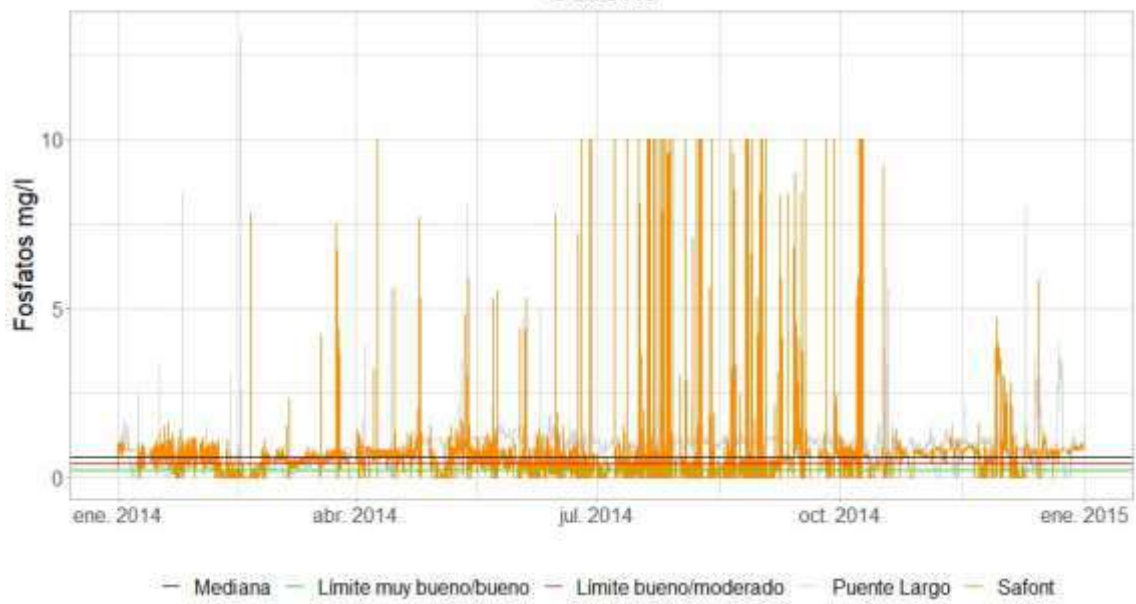




Puente Largo

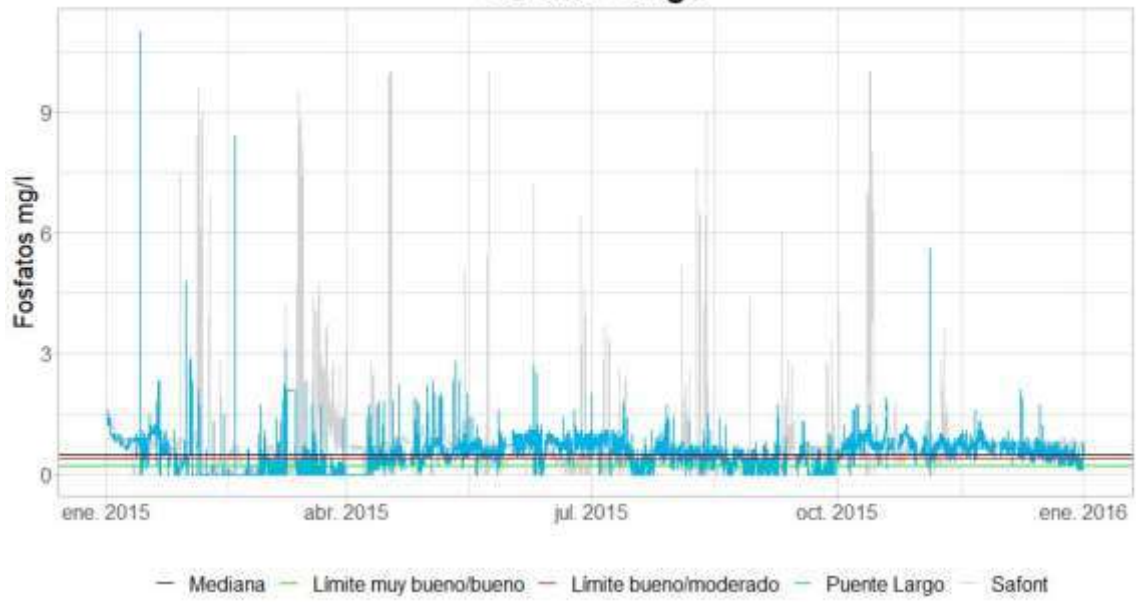


Safont

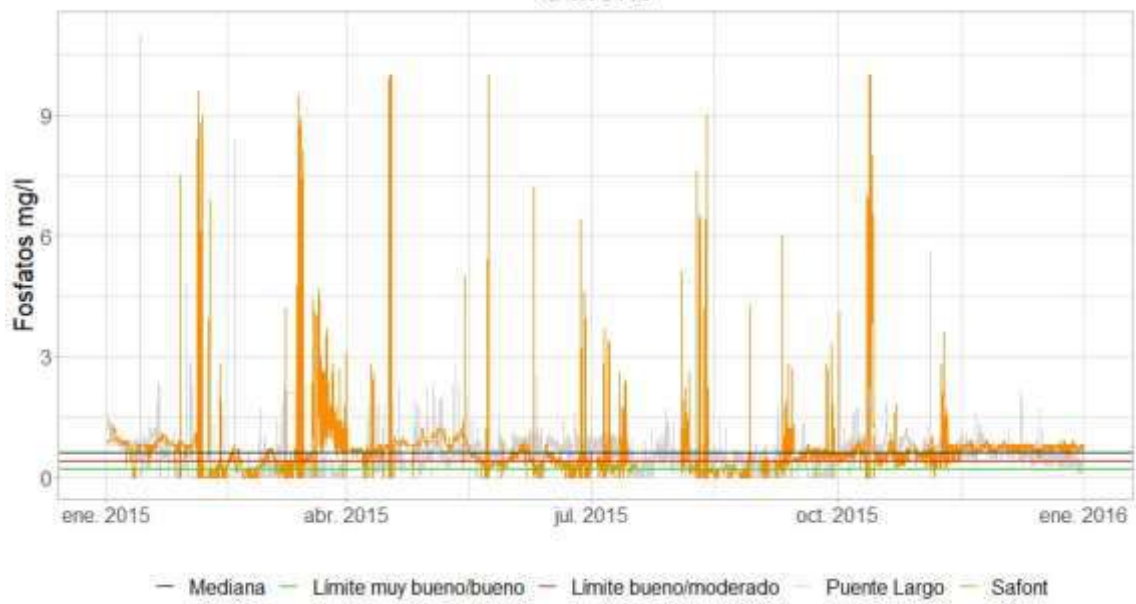




Puente Largo

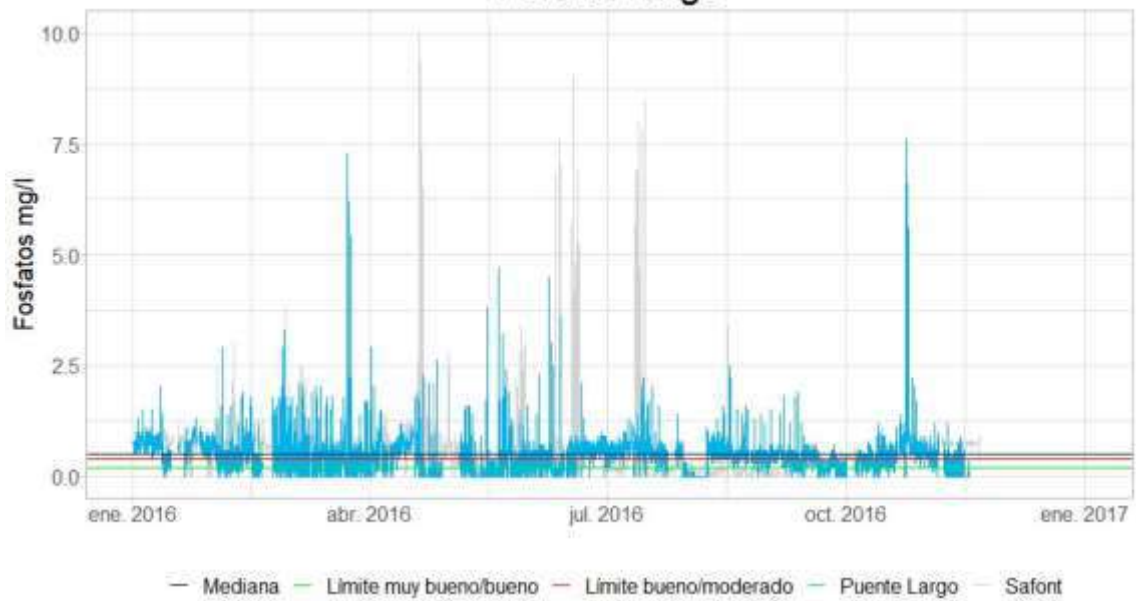


Safont

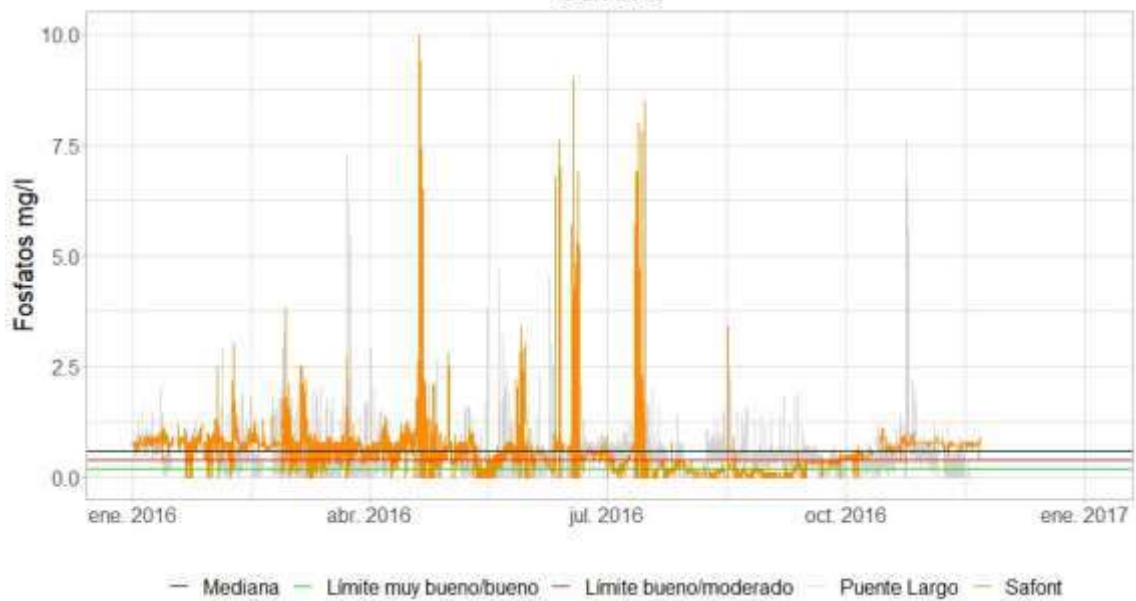




Puente Largo

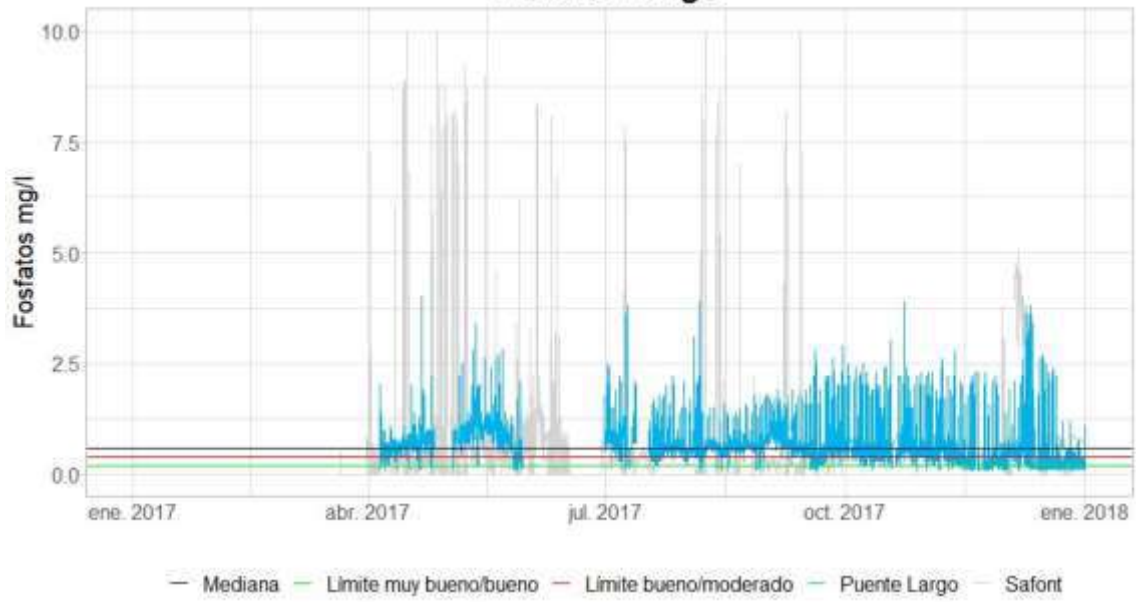


Safont

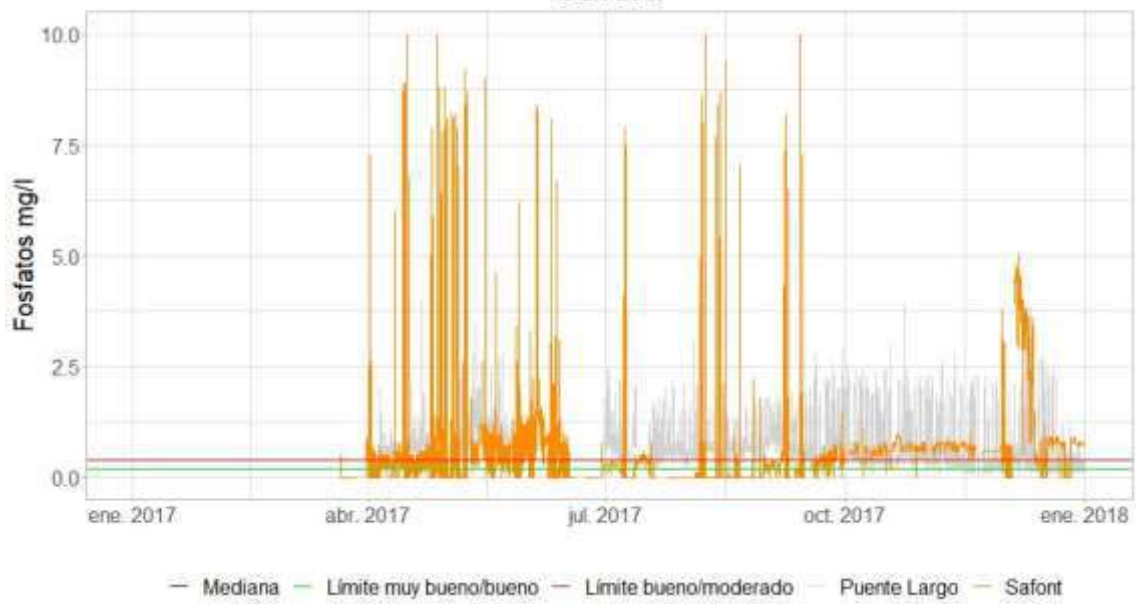




Puente Largo

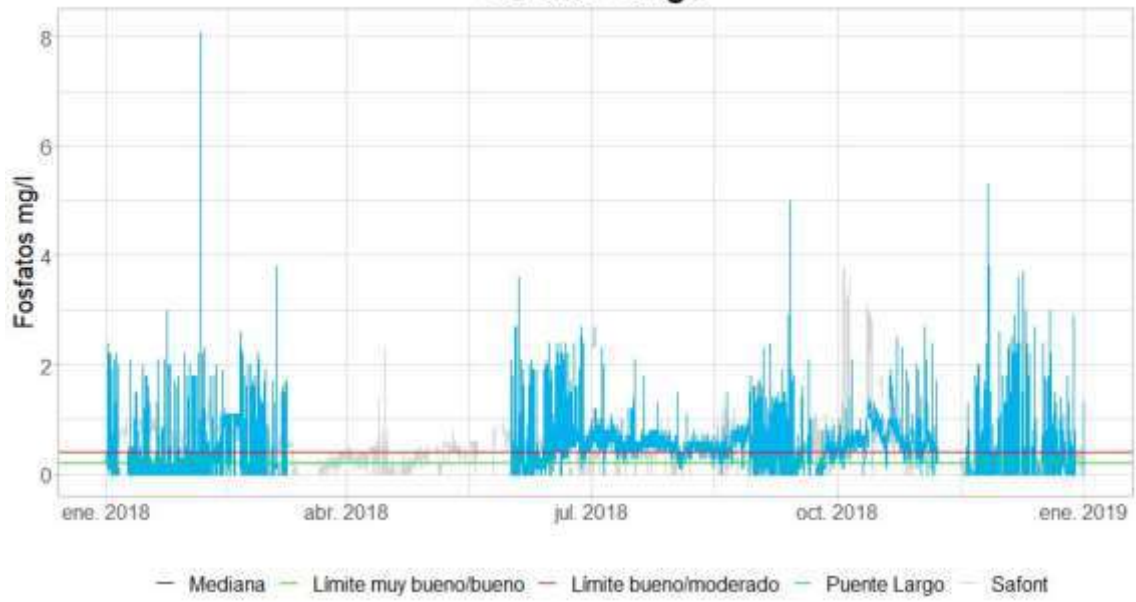


Safont

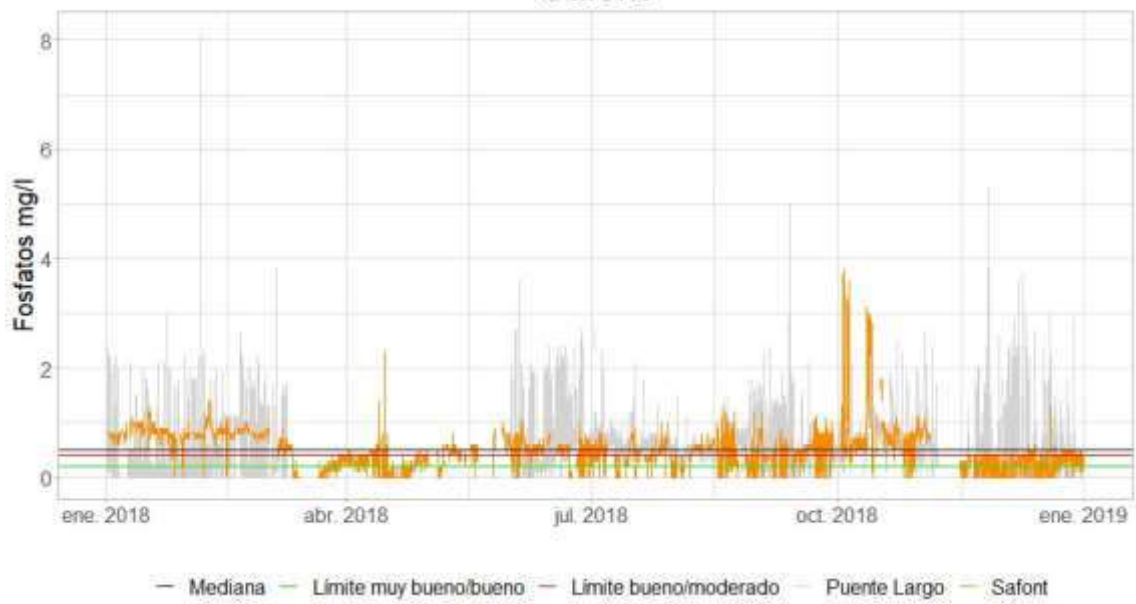




Puente Largo

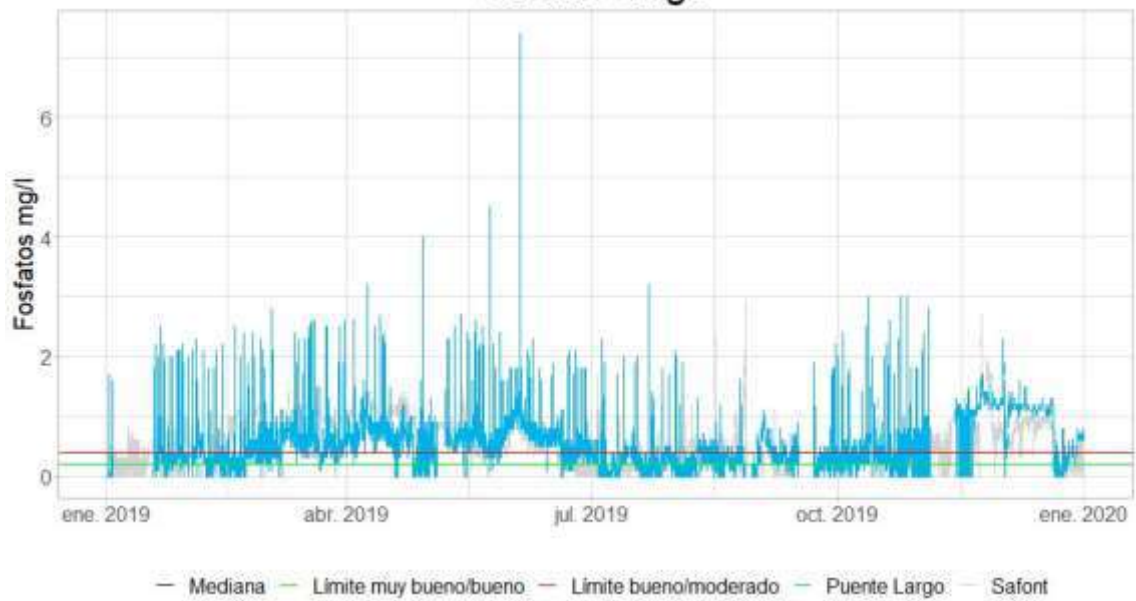


Safont

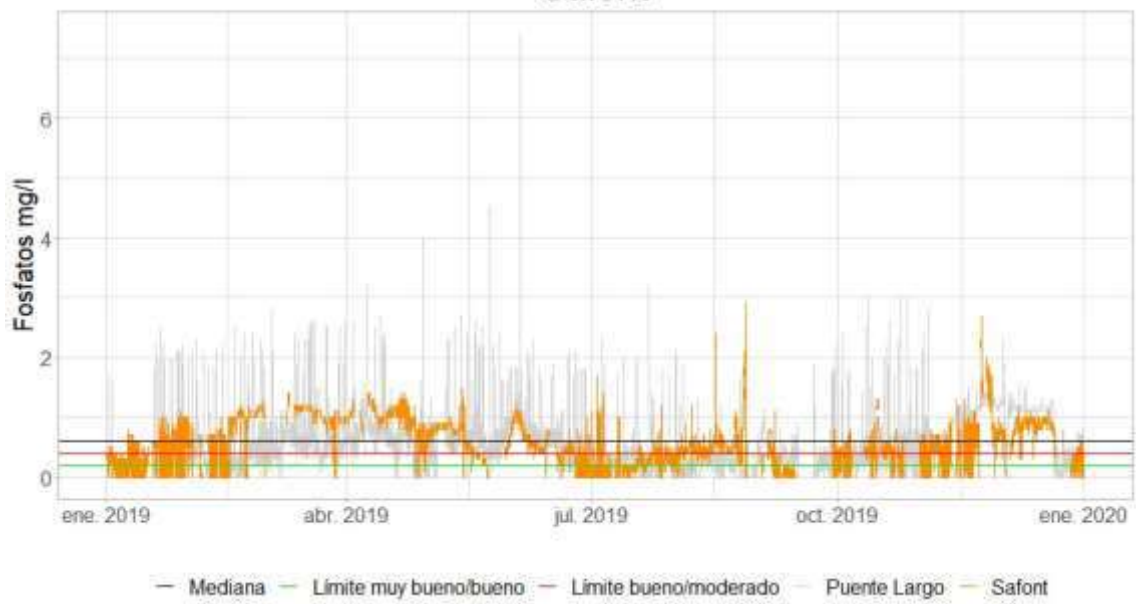




Puente Largo

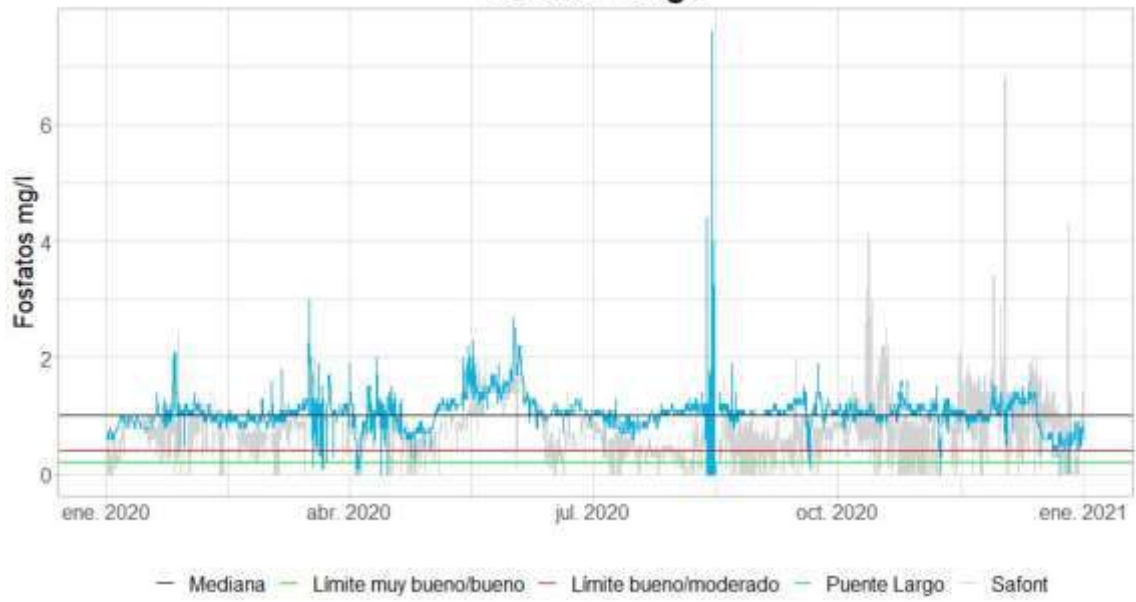


Safont

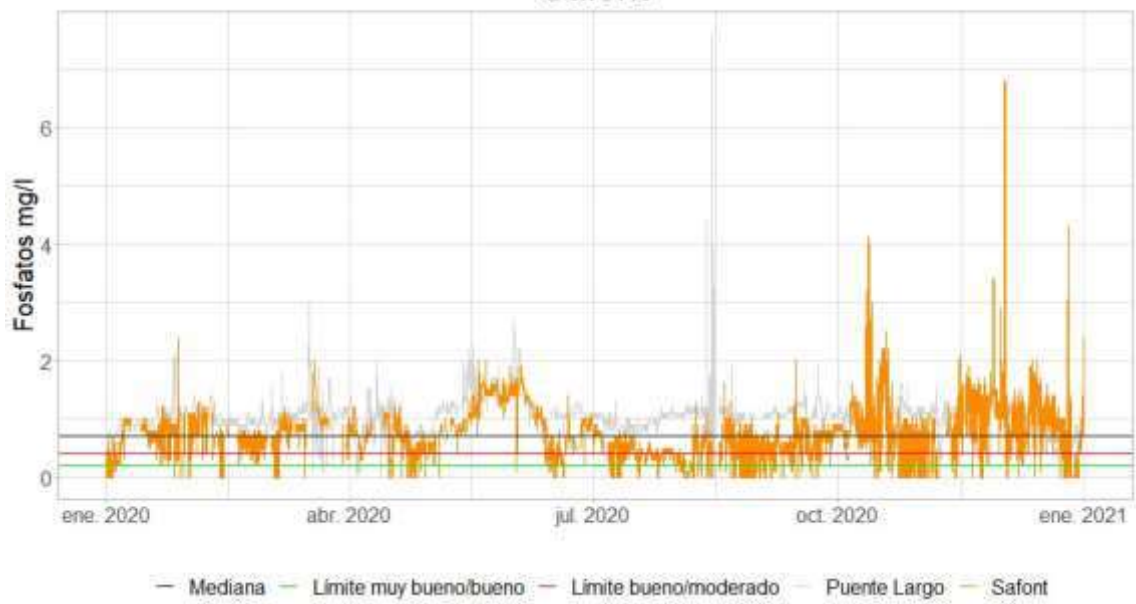




Puente Largo



Safont





Puente Largo



Safont

