



Generación de Insumos y Herramientas para la Toma de Decisiones en la Estrategia Integral para la Recuperación del Río Santiago

4

Análisis de la Base de Datos





CONTENIDO E ÍNDICES

4.1	ASPECTOS GENERALES DE LA INFORMACIÓN	4-1
4.2	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	4-5
4.2.1	Sitios de monitoreo	4-5
4.2.2	Calidad del agua	4-9
4.3	EVALUACIÓN HISTÓRICA DE CALIDAD DEL AGUA	4-9
4.3.1	Primer tramo (RZ1 a RZ7).....	4-10
4.3.2	Río Santiago tramo Alto Santiago (Ocotlán RS1, a Macrolibramiento RS4).....	4-16
4.3.3	Tercer tramo en zona de El Ahogado hasta Paso de Guadalupe (A1/A2 a RS9)..	4-23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1	Eventos de muestreo distribuidos por cuerpo de agua	4-3
Tabla 4-2	Distribución de los sitios de monitoreo.....	4-8
Tabla 4-3	Clasificación de la calidad en cuerpos de agua.....	4-10

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1	Eventos de muestreo realizados en el período 2000 – 2019	4-2
Figura 4-2	Eventos de muestreo distribuidos por cuerpo de agua.....	4-3
Figura 4-3	eventos de muestreo distribuidos por temporal.....	4-4
Figura 4-4	Ubicación de los sitios de monitoreo.....	4-7
Figura 4-5	Calidad del agua - Sitio RZ7 río Zula en Ocotlán	4-11
Figura 4-6	Sitio RZ7 Ocotlán – DBO ₅ (estiaje y lluvias)	4-13
Figura 4-7	Sitio RZ7 Ocotlán – OD (estiaje y lluvias)	4-14
Figura 4-8	Sitio RZ7 Ocotlán – N-Total (estiaje y lluvias).....	4-14
Figura 4-9	Sitio RZ7 Ocotlán – P-Total (estiaje y lluvias).....	4-15
Figura 4-10	Calidad del agua - Sitio RS1 Ocotlán.....	4-17
Figura 4-11	Calidad del agua - Sitio RS2 aguas abajo compuertas Poncitlán en este estudio..	4-19
Figura 4-12	Calidad del agua - Sitio RS3 Presa Corona.....	4-21
Figura 4-13	Calidad del agua - Sitio RS4 Macrolibramiento.....	4-22
Figura 4-14	Calidad del agua - Sitio A1 arroyo El Ahogado No.1.....	4-24
Figura 4-15	Calidad del agua - Sitio A2 arroyo El Ahogado No.2.....	4-26
Figura 4-16	Calidad del agua - Sitio RS5 El Salto – Juanacatlán	4-28
Figura 4-17	Comportamiento de la DBO en el río Santiago y su afluente El Ahogado.....	4-29
Figura 4-18	Calidad del agua - Sitio RS6 Puente Grande	4-30
Figura 4-19	Calidad del agua - Sitio RS7 Puente Matatlán	4-31
Figura 4-20	Calidad del agua - Sitio RS8 aguas arriba río Verde	4-32
Figura 4-21	Calidad del agua - Sitio RS9 Puente Guadalupe.....	4-33



La integración de la información de calidad de agua de río Santiago que se ha venido obteniendo en diferentes estudios, así como en el monitoreo rutinario que realiza la CEA Jalisco, ha acumulado un acervo que requiere para su análisis, el uso de herramientas de manejo de información como lo son los programas de manejo de información geográfica, programas de manejo de bases de datos que permiten filtrar la información para su análisis y la generación de gráficas dinámicas.

En esta sección del reporte, se presenta un análisis de la evolución de la calidad de agua del río Santiago y Zula que se obtienen con la ayuda de programas de manejo de base de datos como Access, el uso de tablas y gráficos dinámicos de Excel y el apoyo del programa de simulación SWAT que proporciona la estimación de caudales en los diferentes puntos del río Santiago donde no se tienen registros.

El proceso de incorporación de la información de calidad de agua de los diferentes estudios incluyó una labor de validación y control de calidad de la información que le proporciona un muy buen grado de confiabilidad a la información con relación a la fidelidad de la información generada en los diferentes estudios.

Al contar con una base de datos que reproduce con alta fidelidad los resultados obtenidos de los diferentes estudios, el paso siguiente consistió en realizar una verificación de la consistencia analítica de los resultados, esto es, los resultados obtenidos correlacionados con otros parámetros de calidad de agua fueran consistentes.

Con el fin de verificar la consistencia con relación al balance de masa, se realizaron balances de masa en puntos especiales del cauce principal con la ayuda de la información generada por la simulación hidráulica para los casos en los que no se cuenta con registros de caudal.

Destaca en la información disponible en la base de datos que un porcentaje superior al 70% de los registros no cuentan con el aforo correspondiente, generando limitaciones en los estudios previos que no registraron el caudal como uno de los datos a obtener en el trabajo de campo.

Para este estudio se realizaron mediciones de aforo en los sitios que las condiciones hidráulicas lo permitieron, siendo por ello los resultados del modelo hidrológico una gran herramienta para la interpretación de la información obtenida en este estudio y para el análisis de la información histórica de calidad de agua.

4.1 ASPECTOS GENERALES DE LA INFORMACIÓN

Como se mencionó en la **Sección 2**, la base de datos integra el histórico de calidad del agua de los ríos Zula y Santiago recabada de distintos estudios y campañas de monitoreo realizados por la Comisión Estatal del Agua (CEA Jalisco), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET).

La base de datos de calidad de agua del río Santiago tiene registros a partir del año 2000 y desde entonces hasta fines del 2019, se tiene registro de 2,800 eventos de muestreos realizados, lo que resulta en un promedio de 147 muestreos anuales en el periodo. Cada evento de muestreo se refiere a cada uno de los registros de la base de datos, en el cual se incluye



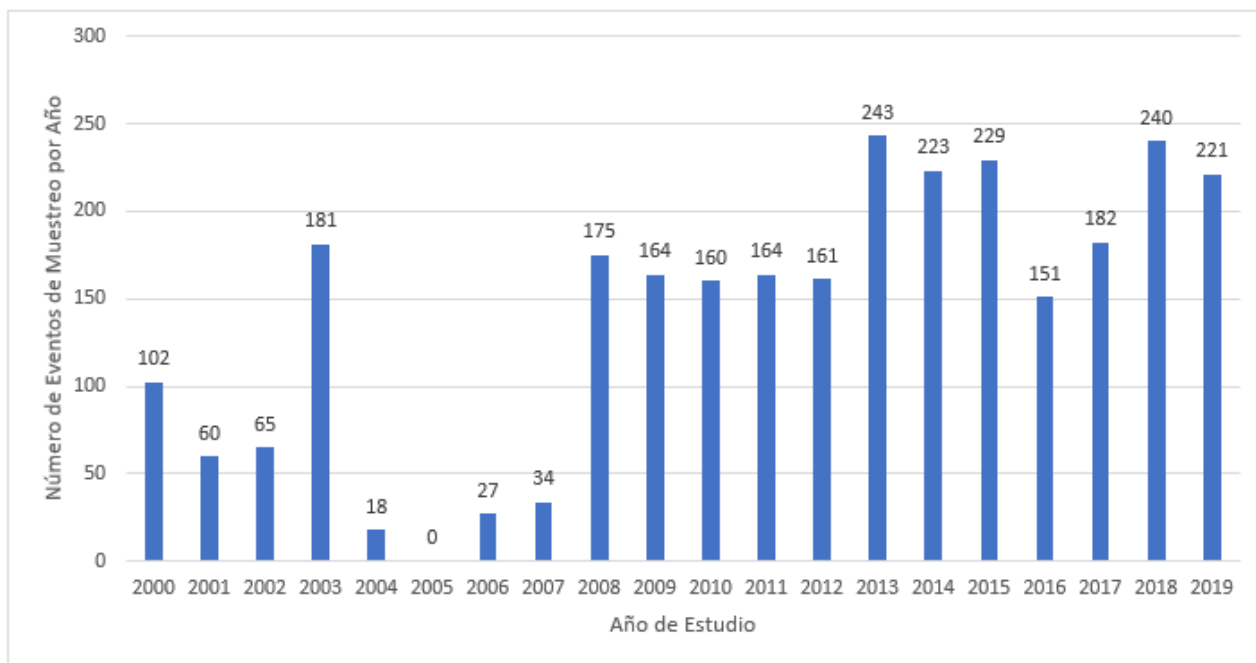
información del sitio de monitoreo, fecha de monitoreo, estudio al que pertenece, quién lo realizó y los valores obtenidos en cada una de las determinaciones realizadas.

Cabe mencionar que la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), ahora CONAGUA, ha realizado el monitoreo de los ríos Santiago y Zula desde 1970; sin embargo, en la Red Nacional de Monitoreo (RNM) únicamente se encuentran disponibles los resultados de monitoreo a partir del año 2000, los cuales se incluyen en la base de datos.

En el año 2005 no se realizaron trabajos de monitoreo o estudios en la corriente principal de los ríos Santiago y Zula.

En la **Figura 4-1** se muestra la distribución anual de los eventos de muestreo realizados en el periodo 2000-2019, donde puede observarse que en los años del 2013 a 2015 y 2017 a 2019 son los años donde se han realizado la mayor cantidad de muestreos, lo que representa 47.8% del total de muestreos realizados a lo largo del periodo mencionado.

Figura 4-1 Eventos de muestreo realizados en el período 2000 – 2019



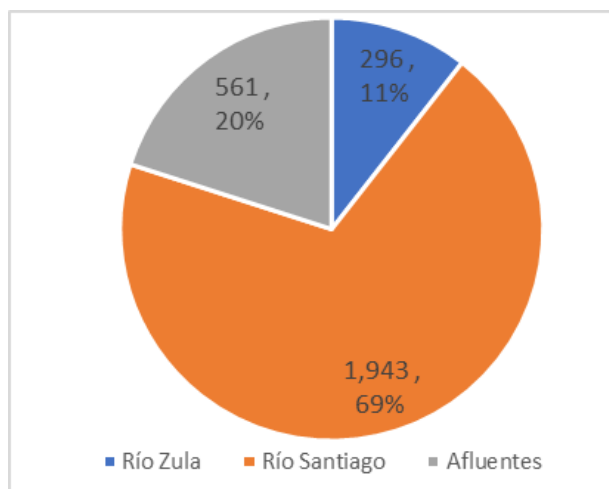
Fuente: Elaboración propia.

Cerca del 80% de los 2,800 eventos de muestreo han sido realizados en los ríos Zula y Santiago y el restante 20% se han realizado sobre los afluentes a estos ríos, siendo el río Santiago el que concentra una mayor cantidad de eventos de muestreo con el 69%, que muestra la importancia que ha representado esta corriente para el monitoreo de la calidad de agua.

En la **Figura 4-2** se muestra de manera gráfica la distribución de muestreos realizados en el cauce principal y sus afluentes, y en la **Tabla 4-1** se muestra de manera desagregada esta misma distribución.



Figura 4-2 Eventos de muestreo distribuidos por cuerpo de agua



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-1 Eventos de muestreo distribuidos por cuerpo de agua

Cuerpo de Agua	Número de muestreos	Distribución porcentual
Arroyo Santiaguito	1	0.03%
Arroyo El Ahogado	442	15.8%
Arroyo El Pueblito	3	0.1%
Arroyo La Laja	51	1.8%
Arroyo Los Morales	3	0.1%
Arroyo Los Sabinos	4	0.1%
Arroyo Rancho Alegre	20	0.7%
Rio Calderón	3	0.1%
Rio Chico	3	0.1%
Rio Santiago	1,943	69.4%
Rio Zapotlanejo	31	1.1%
Rio Zula	296	10.6%
Total general	2,800	100.0%

Como se aprecia en la **Tabla 4-1**, el arroyo El Ahogado es el afluente con mayor número de muestreos (15.8% del total), esto se debe a la importancia que representa este afluente por el caudal que aporta al río Santiago y los efectos ambientales que provoca la aportación de materia orgánica al río Santiago.



Este afluente conduce las aguas residuales generadas en la zona sur oriente del AMG y que a partir del 2012 son tratadas en la planta de tratamiento de aguas residuales El Ahogado (PTAR El Ahogado), destacando la aportación de aguas residuales en la zona de Tlajomulco y El Salto que actualmente no son conducidas a la PTAR El Ahogado y por tanto no son tratadas.

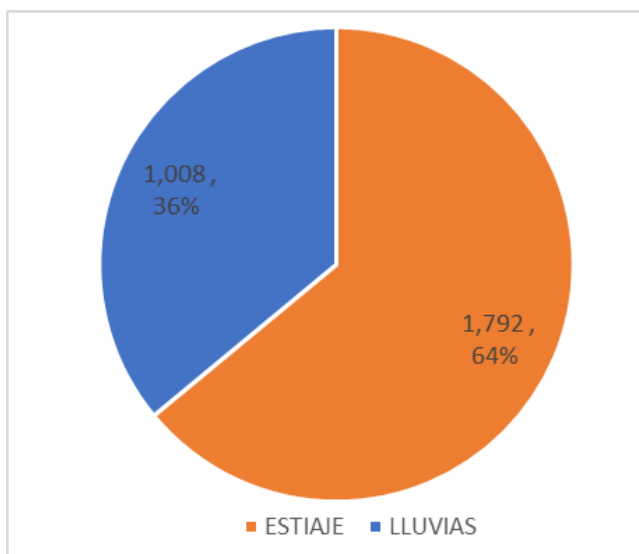
El comportamiento de la calidad del agua es afectado por la época del año en la que se hace el muestreo, siendo la temporada de estiaje la de mayor duración en el año y es donde más se puede apreciar el impacto que generan los afluentes y se pueden estimar las aportaciones de cargas contaminantes a la corriente principal y con ello identificar las causas que generan los cambios observados en la calidad del agua del cauce principal.

En la temporada de estiaje el caudal observado corresponde al flujo base más las aportaciones que reciben de las aguas residuales tratadas o sin tratar generadas en la zona. Apoyados en los flujos generados por el modelo hidrológico para aquellos puntos en donde no se tienen registros de caudal, se realizaron verificaciones de balance de masa para evaluar la consistencia de la información de calidad del agua.

En los meses de lluvia se realizó un análisis de la información de manera similar a lo realizado en la información de estiaje, destacando la variabilidad de la información como resultado de los diferentes patrones de lluvia en el periodo de estudio, que si bien mantienen una tendencia, no muestran el comportamiento más sostenido que se observa en el periodo de estiaje. Esto se atribuye a que el escurrimiento de agua de las corrientes está determinado por el comportamiento de la lluvia en las cuencas de aportación en los días precedentes, y éstos varían de año a año.

En la **Figura 4-3** se muestra que la base de datos cuenta con 2,800 registros de eventos de muestreo, de los cuales el 64% corresponden al temporal de estiaje y el 36% restante al temporal de lluvias, considerando que los meses de lluvias corresponden al periodo de julio a octubre y los 8 meses restantes, se consideraron como estiaje, aunque hay variaciones de año a año.

Figura 4-3 eventos de muestreo distribuidos por temporal



Fuente: Elaboración propia.



4.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El análisis de la información permitió identificar valores atípicos en el comportamiento de la calidad del agua de la corriente principal y que requieren de una revisión especial toda vez que son datos verificados con respecto a los resultados reportados en los diferentes estudios, pero que no responden al comportamiento esperado después de analizar el balance de masa y el comportamiento histórico de la calidad de agua en la corriente principal.

Los valores atípicos observados no fueron considerados para fines de evaluación de la calidad, pero se mantienen como registros válidos de la base de datos. Estos registros fueron identificados para que sean considerados como información de manejo reservado y que requieren ser validados por los autores de la información para que sean conservados en la base de datos.

4.2.1 Sitios de monitoreo

Los 2,800 eventos de monitoreo realizados desde el primer estudio realizado en el río Santiago presentan diferentes puntos de monitoreo que responden a diferentes necesidades de cada uno de los estudios realizados. En la **Sección 3 Plan de Monitoreo**, se describen los puntos de monitoreo utilizados en este estudio y los motivos por los que fueron seleccionados, de manera similar a los sitios de monitoreo seleccionados por los otros estudios comprendieron diferentes objetivos.

Con la finalidad de realizar un análisis de las diferentes campañas de monitoreo se seleccionaron puntos estratégicos, donde las variaciones en el caudal o en calidad de agua muestran cambios significativos.

El conjunto de datos obtenidos tanto en este estudio como en estudios anteriores permite observar un panorama claro del comportamiento del cauce principal en las diferentes condiciones estacionales y a lo largo del periodo de estudio.

Entre el primer sitio de muestreo en el río Zula (RZ1) y el último sitio de muestreo del río Santiago (RS9) realizado en la campaña del monitoreo del 2019, existe una distancia de 256 kilómetros. En este tramo se localizaron 2,800 puntos, lo que resulta un promedio de 10.9 muestreos por kilómetro. Al ser estos tramos muy largos el uso de la información del modelo hidrológico es muy útil para correlacionar la información de calidad con la de cantidad y con ello establecer un análisis de mayor confiabilidad.

Un elemento utilizado para el análisis fue el seccionamiento del río Santiago por tramos, con objeto de homogenizar diferentes puntos de monitoreo localizados dentro de un margen de 100 m de distancia aguas arriba y 100 m aguas abajo en los diferentes estudios realizados.

Con base en los sitios monitoreados en las campañas realizadas en este estudio (año 2019), en la cual se le asignó la misma clave de monitoreo a aquellos sitios localizados dentro del margen de distancia propuesto para los sitios de monitoreo del año 2019.

Con esta clasificación, se lograron homogenizar 1,275 eventos de monitoreo, dejando 1,525 sitios que carecen de repetitividad y que su aportación al análisis del comportamiento histórico de calidad del agua de la corriente principal es de limitado valor. Estos sitios, se encuentran a lo largo del cauce principal y respondieron a diversas necesidades de los estudios

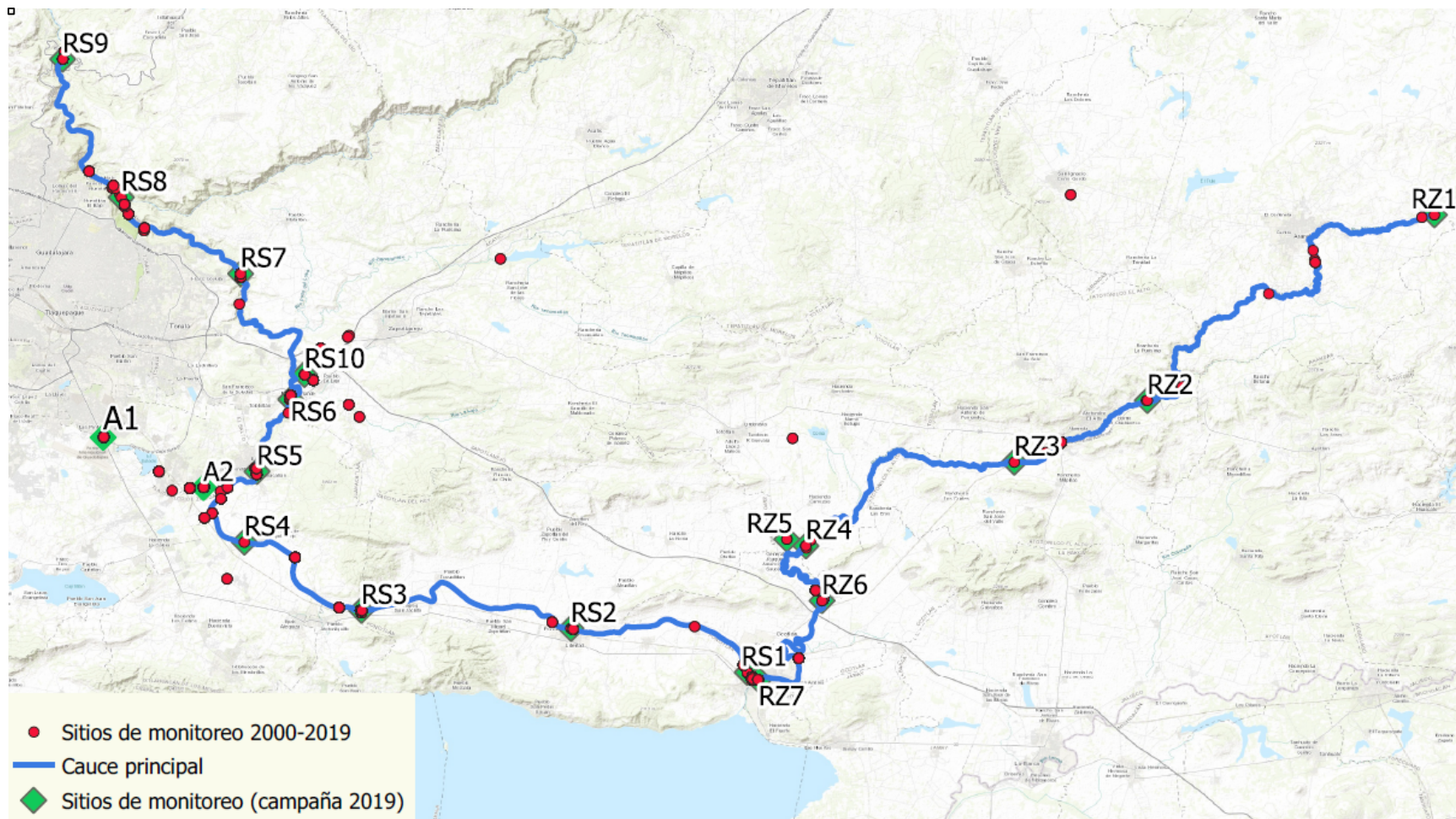


correspondientes. En otros casos, por ejemplo el puente del macrolibramiento-libramiento, en este período se han construidos algunos puentes que facilitan la toma de muestras y el aforo.

En la **Figura 4-4** se muestra la ubicación de los sitios de monitoreo y en la **Tabla 4-2** se muestra el número de sitios correspondientes por clave de monitoreo de acuerdo a la clasificación descrita.



Figura 4-4 Ubicación de los sitios de monitoreo



Fuente: Elaboración propia.



Tabla 4-2 Distribución de los sitios de monitoreo

Clave del sitio de monitoreo	Sitio de monitoreo	Número de eventos de muestreo (2000-2019)
A1	Ahogado No.1	175
A2	Ahogado No.2	166
RS1	En Ocotlán	36
RS10	Puente La Laja	17
RS2	Aguas debajo compuertas Poncitlán	2
RS3	En Presa Corona	54
RS4	En Macrolibramiento	2
RS5	En Salto Juanacatlán	219
RS6	En Puente Grande	178
RS7	En Puente Matatlán	192
RS8	Aguas arriba río Verde	2
RS9	En Puente de Guadalupe	108
RZ1	Aguas arriba Arandas	2
RZ2	Aguas arriba Atotonilco	3
RZ3	Aguas abajo Atotonilco	2
RZ4	Aguas arriba SM Zula	6
RZ5	Afluente Tototlán	3
RZ6	En SM de Zula	3
RZ7	En Ocotlán	105
<i>Total de sitios reclasificados</i>		<i>1,275</i>
<i>Otros Sitios</i>		<i>1,525</i>
Total general		2,800



4.2.2 Calidad del agua

La base de datos de calidad del agua cuenta con registro de 607 parámetros de calidad del agua entre compuestos físicos, biológicos y químicos orgánicos e inorgánicos.

De los 2,800 eventos de muestreo registrados, se tiene un promedio de 32 parámetros monitoreados por evento, habiendo hasta 438 parámetros analizados por sitio de muestreo en uno de los estudios consultados por evento. Con los 1,071 eventos de monitoreo utilizados para el análisis, el promedio pasa a 33 parámetros monitoreados por evento, siendo 43 el máximo número de parámetros monitoreados por evento.

El análisis que se presenta en esta sección se centra en contaminantes típicos de las aguas residuales domésticas, como lo son la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), nitrógeno total (N-total) y fósforo total (P-total), debido a que son los parámetros más estudiados y son un indicador de las aportaciones de aguas residuales al cauce principal, lo que permite derivar el análisis a otro tipo de contaminantes en puntos específicos del cauce principal.

Un parámetro considerado dentro de la evaluación histórica es el oxígeno disuelto (OD), ya que este parámetro nos indica el grado de oxigenación de la corriente, esto es, la capacidad de autodepuración que puede tener la corriente y en conjunto con la concentración de la DBO₅ indica las condiciones aerobias que presenta la corriente principal.

4.3 EVALUACIÓN HISTÓRICA DE CALIDAD DEL AGUA

Con base en la información de los 1,071 eventos de muestreo, se procedió a realizar el análisis de la información de calidad del agua en los 19 sitios de monitoreo distribuidos en los ríos Santiago y Zula y el arroyo El Ahogado.

Para mayor claridad en la secuencia, análisis e interpretación de la información, el cauce principal se presenta en tres tramos:

- Primer tramo: río Zula que comprenden desde el nacimiento en Santiaguito hasta Ocotlán (sitio RZ1 a RZ7).
- Segundo tramo: río Santiago del sitio desde su nacimiento en Ocotlán hasta su cruce con el macro libramiento (RS1 al RS4).
- Tercer tramo: río Santiago en su confluencia con el arroyo El Ahogado hasta puente de Guadalupe (sitios RS5 a RS9), los sitios del arroyo El Ahogado son A1 y A2.

Con el fin de establecer parámetros de comparación de la evolución histórica de la calidad del agua en los ríos Zula y Santiago se propone tomar como criterio de referencia los valores de clasificación de la calidad de agua en cuerpos de agua propuestos por CONAGUA (CONAGUA, 2019), que se presentan a continuación en la **Tabla 4-3**.



Tabla 4-3 Clasificación de la calidad en cuerpos de agua

Parámetro	Contaminada	Aceptable	Buena calidad	Excelente
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	>1,000 y <10,000	>200 y <1,000	>100 y <200	<100
DBO ₅ (mg/l)	>30 y <120	>6 y <30	>3 y <6	<3
DQO (mg/l)	>40 y <200	>30 y <120	>10 y <20	<10

4.3.1 Primer tramo (RZ1 a RZ7)

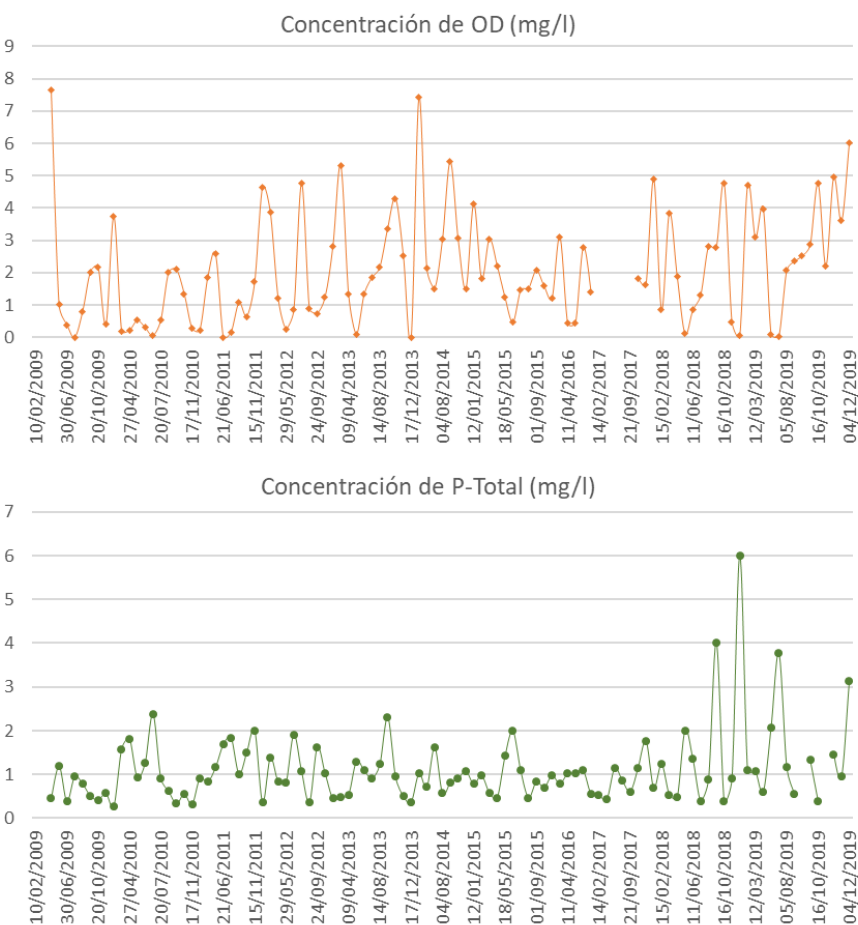
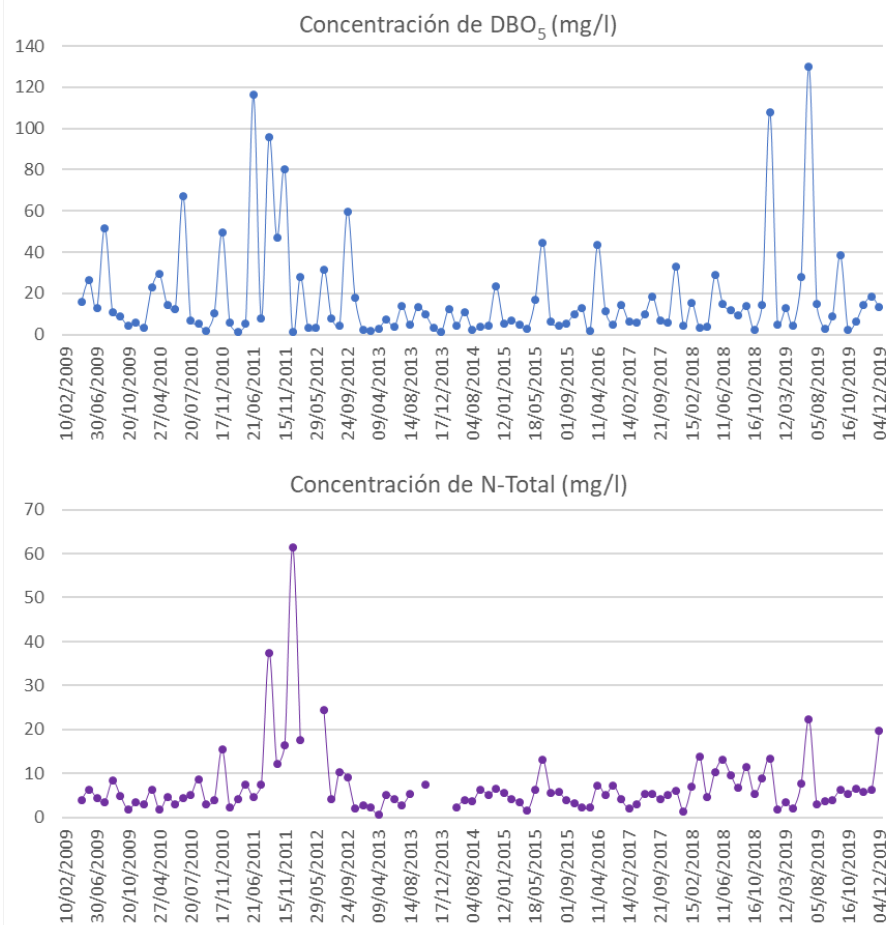
Como se observa en la **Tabla 4-2**, los sitios monitoreados en la parte alta del río Zula, cuentan con pocos datos que reducen la posibilidad de evaluar la evolución histórica del agua, ya que de los sitios RZ1 al RZ6 solo cuentan con registros de 19 eventos de muestreo para el periodo 2000-2019, siendo que 12 de los 19 eventos registrados corresponden a los realizados en la campaña de monitoreo del año 2019.

En el caso del sitio río Zula en Ocotlán (RZ7), el panorama es distinto, ya que este sitio cuenta con 105 eventos de monitoreo.

En la **Figura 4-5** se muestra la variación en la concentración de DBO₅, N-total, P-total y OD en el sitio RZ7 (Ocotlán) en un periodo de 10 años (2009-2019).



Figura 4-5 Calidad del agua - Sitio RZ7 río Zula en Ocotlán



Fuente: Elaboración propia.





El promedio de la concentración de DBO_5 es de 18 mg/l, que de acuerdo con los criterios de CONAGUA se puede clasificar como aceptable, pero muestra picos de concentración que superan los 40 mg/l, principalmente en los meses de lluvia, lo que puede atribuirse a los arrastres pluviales de materia orgánica.

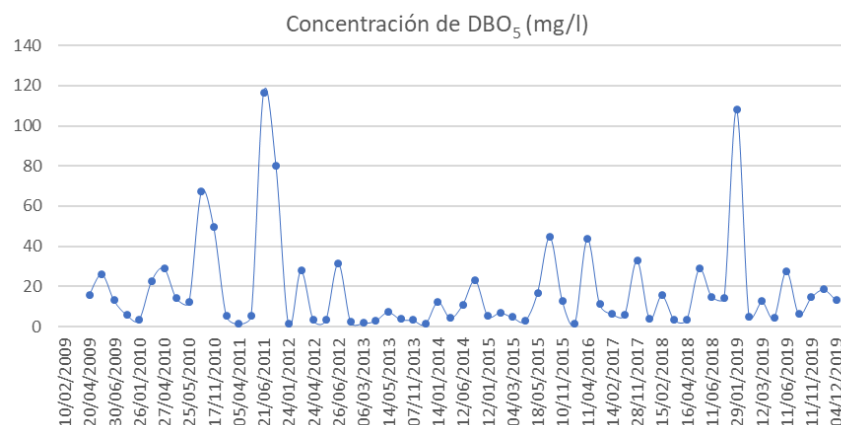
En este punto no se aprecia una tendencia anualizada de cambio en la calidad de agua, lo que puede indicar que las acciones de saneamiento realizadas en la cuenca han mantenido un efecto estable aun cuando ha habido un incremento de las actividades económicas en la región y aun cuando algunas de las plantas de tratamiento han presentado problemas de operación en los últimos años.

Al presentar en la mayoría de las determinaciones resultados inferiores a 20 mg/l de DBO_5 , se puede esperar que acciones de saneamiento en las descargas municipales de las principales localidades como son Arandas, Atotonilco y Ocotlán, así como un mayor control en las descargas de unidades económicas posibiliten una mejor calidad del río para pasar de aceptable a buena.

Con respecto al OD, se aprecian variaciones desde los 5 mg/l que en la mayoría de estos casos ocurren en los meses de lluvias y cercanas a cero con mayor frecuencia en los meses de estiaje. Este comportamiento nos indica que en ciertos periodos del año existen condiciones aerobias que posibilitan mejores condiciones para la autodepuración probablemente debido a que el agua pluvial después de las primeras lluvias contiene menos materia orgánica y mayor oxígeno disuelto, lo que no sucede en el periodo de estiaje, en donde la corriente principal presenta menor caudal y con ello menor capacidad de dilución al momento de recibir las descargas puntuales.

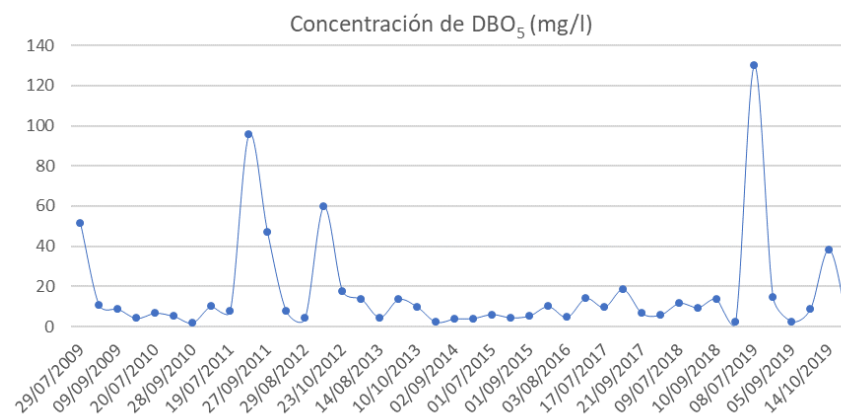
Al hacer una revisión de las variaciones estacionales, se puede observar que en la mayoría de los muestreos la concentración de DBO_5 se mantienen por debajo de los 20 mg/l en ambas estaciones del año, los muestreos que superan este valor son más frecuentes en estiaje y para el caso de la temporada de lluvias la mayoría de los muestreos se ubican debajo de los 10 mg/l, ver **Figura 4-6**. Sin embargo, en los años 2011 y 2019 (en ambos temporales) se presentan picos de concentraciones superiores a los 80 y 100 mg/l respectivamente, que se pueden explicar como resultado de los arrastres pluviales que aportan una cantidad importante de materia orgánica de las fuentes no puntuales de contaminación.

Este último aspecto es relevante para que en estudios posteriores se evalúe la generación de contaminación por fuentes no puntuales y con base en ello, establecer las acciones más convenientes a realizar para reducir este impacto al río Zula.

Figura 4-6 Sitio RZ7 Ocotlán – DBO₅ (estiaje y lluvias)

Estiaje (concentración promedio 18 mg/l)

Fuente: Elaboración propia.



Lluvias (concentración promedio 16.9 mg/l)

El mismo patrón que ocurre con la DBO₅, se repite con el oxígeno disuelto, nitrógeno y fósforo; no existen variaciones significativas entre un temporal y otro; sin embargo, estos parámetros responden a algunos de los picos presentados en los años 2011 y 2019. En el caso del oxígeno disuelto se observan concentraciones cercanas a cero (**Figura 4-7**), mientras que el nitrógeno alcanza los 15 mg/l y llega a los 60 mg/l en estiaje (**Figura 4-8**), el fósforo en los resultados del 2019 supera los 3.5 mg/l en lluvias y alcanza 6 mg/l en estiaje (**Figura 4-9**).



Figura 4-7 Sitio RZ7 Ocotlán – OD (estiaje y lluvias)

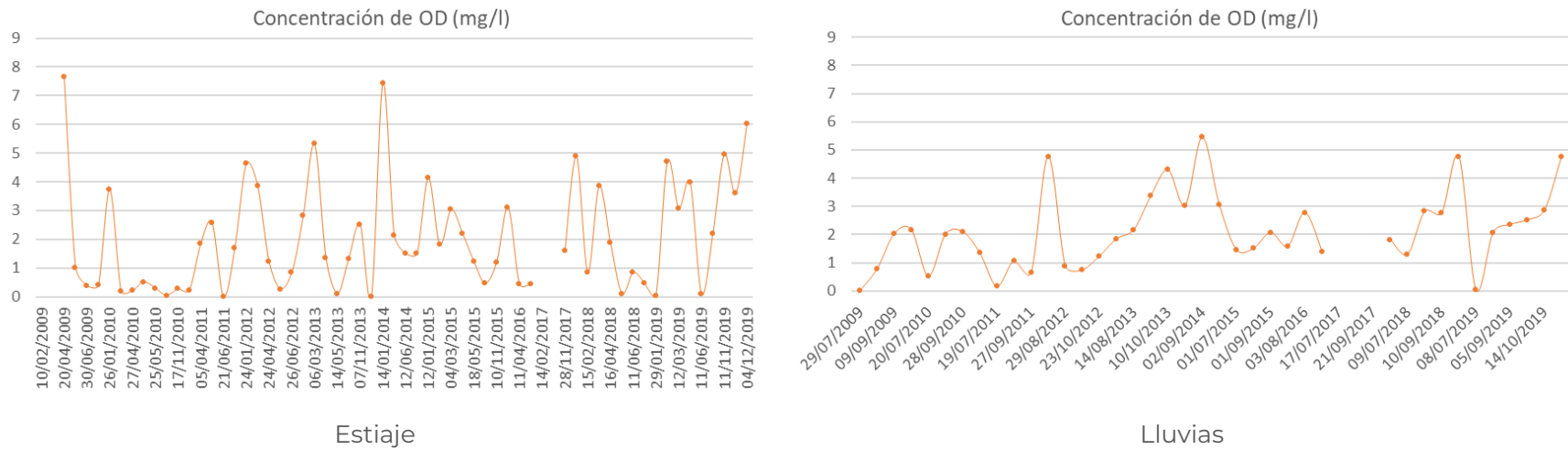
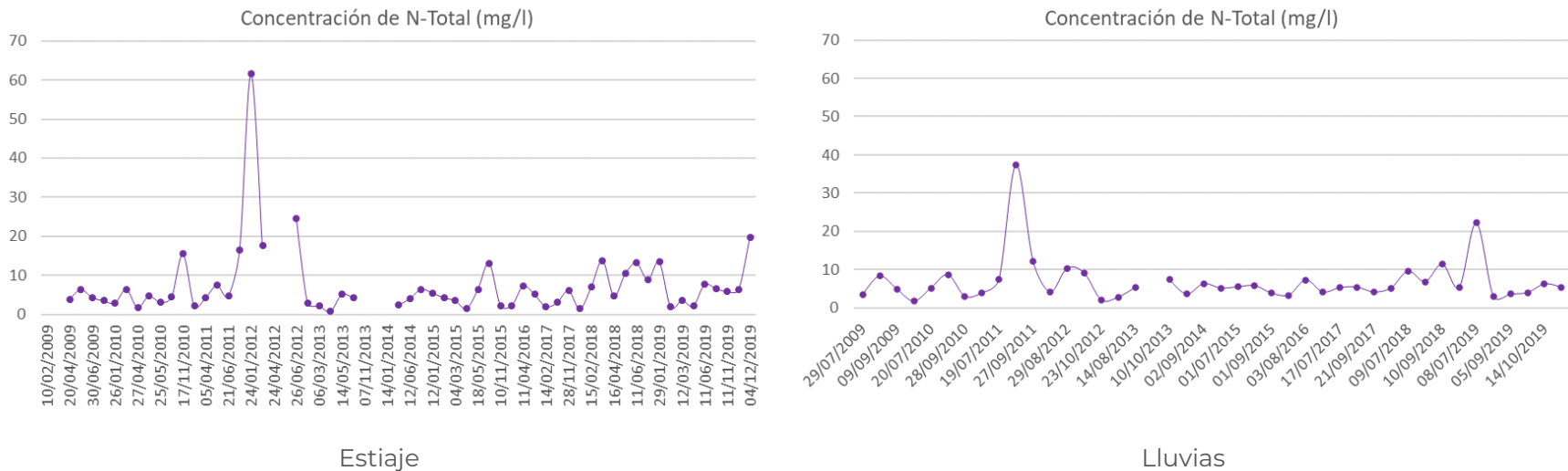


Figura 4-8 Sitio RZ7 Ocotlán – N-Total (estiaje y lluvias)

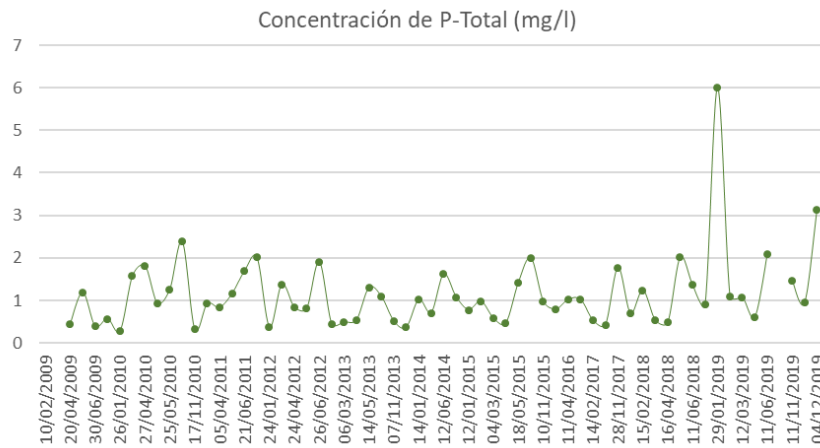


Fuente: Elaboración propia.



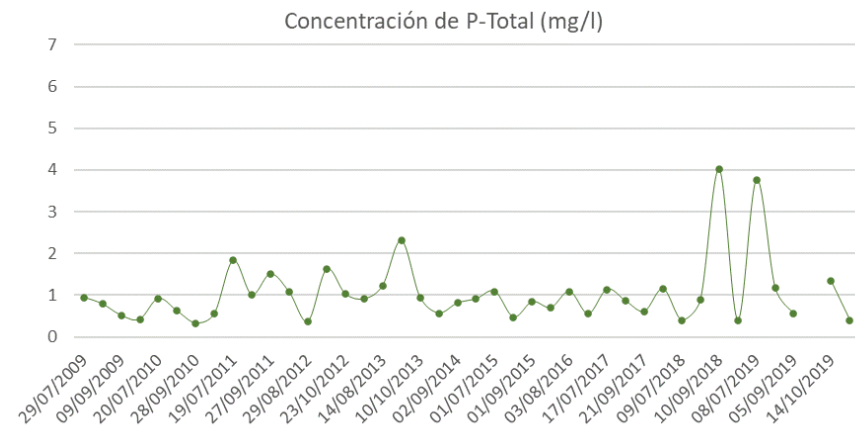


Figura 4-9 Sitio RZ7 Ocotlán – P-Total (estiaje y lluvias)



Estiaje

Fuente: Elaboración propia.



Lluvias



4.3.2 Río Santiago tramo Alto Santiago (Ocotlán RS1, a Macrolibramiento RS4)

El primer sitio de monitoreo en el río Santiago se ubica en Ocotlán, aguas abajo del río Zula y su confluencia con el Lago de Chapala donde nace el río Santiago.

Este tramo del río Santiago tiene varias funciones hidráulicas que en conjunto con la topografía de la zona generan condiciones de calidad de agua singulares.

Entre las funciones hidráulicas del tramo se tiene el manejo que se hace a las aguas procedentes del río Zula en temporada de estiaje y caudales inferiores a $5 \text{ m}^3/\text{s}$, las cuales son conducidas al río Santiago.

En temporada de lluvias cuando el caudal del río Zula supera los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ las aguas son conducidas al Lago de Chapala y las aguas que fluyen en el tramo Ocotlán – Macrolibramiento corresponden al escurrimiento de la cuenca propia.

En la parte alta de este tramo, se conduce el agua reservada para consumo humano del AMG que corresponde a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y otros $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ reservados para riego, que son bombeados del Lago de Chapala al río Santiago el cual conduce este caudal hasta la presa derivadora Corona en donde se derivan para los usos antes mencionados.

Es de destacar que los caudales antes mencionados son promedios anuales y que para el caso de riego en el periodo de lluvias se reduce significativamente el caudal utilizado lo que provoca en la temporada de estiaje la derivación del caudal para riego en este punto puede ser de 4 a $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

La operación de esta sección del río corre a cargo de la CONAGUA y responde a los requerimientos de los usuarios de riego y del SIAPA.

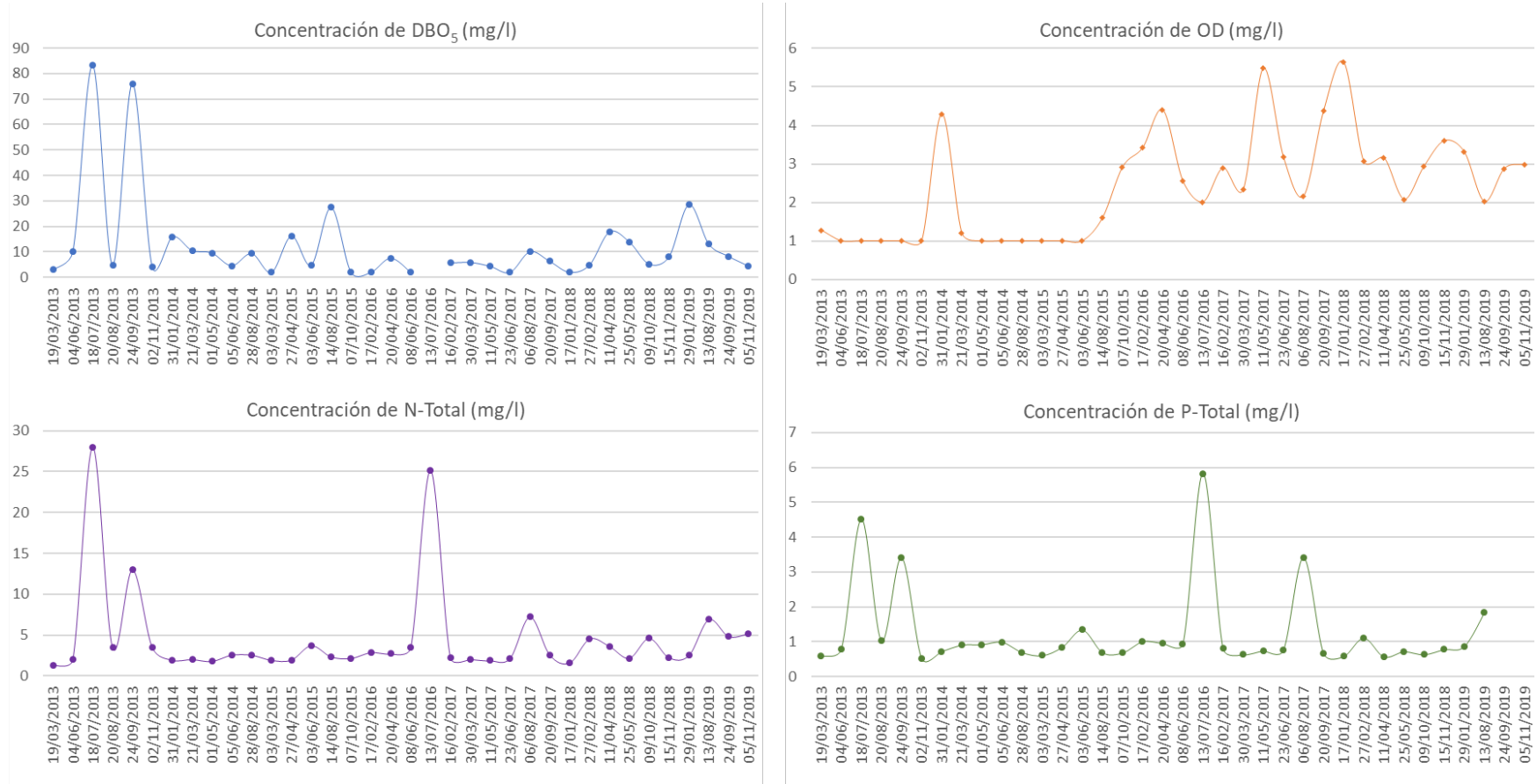
Adicional al manejo hidráulico, se debe tomar en cuenta que la topografía de la zona es sensiblemente plana, provocando una velocidad de flujo en el río Santiago muy baja, que no favorece la oxigenación del agua en este tramo.

Teniendo en consideración estas condiciones hidráulicas y topográficas, se hace una revisión de la calidad de agua histórica del río Santiago en el sitio de Ocotlán, donde se pueden apreciar los efectos de estas condiciones de operación.

En la **Figura 4-10** se muestran los resultados de calidad del agua obtenidos en el sitio RS1, donde puede apreciarse la mejora en la calidad del agua con respecto al último sitio de monitoreo en el río Zula (RZ7), lo que responde en gran medida, a la dilución que se tiene en este punto por el agua de mejor calidad bombeada del Lago de Chapala hacia el río Santiago.



Figura 4-10 Calidad del agua - Sitio RS1 Ocotlán



Fuente: Elaboración propia





Como se aprecia en la figura anterior, la mayoría de los eventos reportan concentraciones de DBO_5 inferior a los 10 mg/l, resultando un promedio de 12.5 mg/l, con eventos pico en los primeros años que pudo deberse a descargas no controladas que posteriormente no han sido detectadas.

El impacto de la dilución redujo la contracción de DBO de agua del río Zula en Ocotlán de 18 mg/l en promedio a los valores observados en el tramo del alto Santiago de 12.5 mg/l. Lo que confirma el efecto de dilución del agua procedente de Chapala.

La disminución en la concentración de DBO_5 se hace más notoria a partir del año 2016, donde a su vez, se tiene un incremento en la concentración de oxígeno disuelto, obteniendo una concentración media de 2.4 mg/l. Los motivos de esta mejoría se deberán investigar con especial atención, para identificar la causa y en caso de responder a acciones de saneamiento determinar con claridad las acciones emprendidas y tratar de replicarlas en otros sitios.

La concentración media de fósforo disminuye entre el Zula y el Santiago en Ocotlán a 1.2 mg/l, siendo más notoria la reducción la concentración de nitrógeno que pasa de 10 mg/l en el sitio RZ7, a 2.4 mg/l en este sitio.

En el sitio RS1, termina el río Zula y nace el río Santiago, que durante todo el año recibe de forma natural los escurrimientos del río Zula y las aportaciones del Lago de Chapala, sin embargo, las acciones tomadas por las autoridades para gestionar el recurso hídrico y asegurar el abastecimiento público y agrícola, ha modificado el funcionamiento del cauce.

Durante el temporal de estiaje, el río Santiago recibe el escurrimiento del río Zula y recibe de manera controlada en promedio anual 4.40 m³/s del lago de Chapala y durante el temporal de lluvias, el Lago de Chapala recibe los escurrimientos del río Zula y los escurrimientos del río Santiago provenientes desde la presa Poncitlán (sitio RS2).

Con base en el comportamiento histórico de calidad de agua se observa que existieron acciones de control de la contaminación, se aprecia su efecto en el año 2016 y posterior a este periodo, el efecto de mejora de la calidad de agua observado se produce por las aportaciones del Lago de Chapala al río Santiago durante el estiaje y en lluvias por el retorno del escurrimiento generado en la zona ubicada entre Poncitlán y Ocotlán. Este fenómeno de retorno se produce gracias a la presa Poncitlán, lo cual actúa como una extensión al Lago de Chapala.

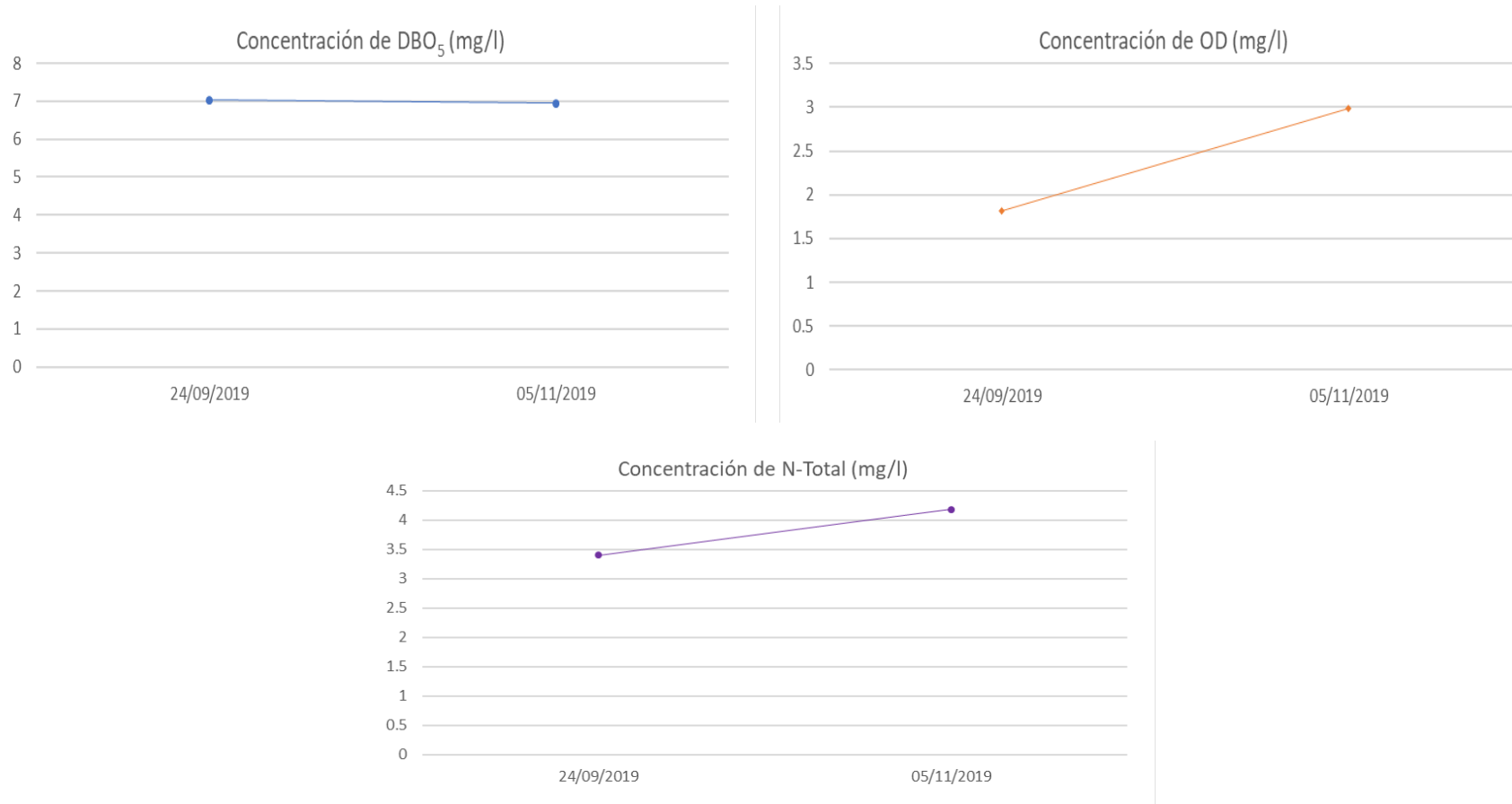
Las concentraciones de DBO_5 y nitrógeno en el sitio RS2 se mantienen muy similares a las obtenidas en el sitio RS1 en los muestreos realizados en los meses de septiembre y noviembre del año 2019. En el caso de la DBO_5 , estos valores se mantienen inferiores a los 10 mg/l y para el nitrógeno inferiores a 5 mg/l, ver **Figura 4-11**.

Lo anteriormente mencionado se confirma con los resultados obtenidos en el balance hídrico en este tramo del río que mantiene caudales muy similares a los calculados en la zona de Ocotlán.

El tramo del río posterior a la presa Poncitlán cuenta con pocos datos de monitoreo, por lo que no permite identificar alguna tendencia a lo largo del tiempo. Los registros que se tienen indican condiciones similares a tramos aguas arriba del río.



Figura 4-11 Calidad del agua - Sitio RS2 aguas abajo compuertas Poncitlán en este estudio



Fuente: Elaboración propia



En el sitio RS3 Presa Corona, la concentración media de DBO_5 está en 9.3 mg/l, mientras que en los muestreos de septiembre y noviembre del 2019 se obtuvieron entre 7 y 4 mg/l respectivamente (**Figura 4-12**), que corresponde a condiciones de buena de calidad del agua que reflejan el efecto favorable de la dilución obtenido en la parte alta del río Santiago. Se observa en este sitio de monitoreo altas concentraciones de DBO y bajo oxígeno disuelto entre los años 2012 y 2013 que no se presenta en años posteriores, este efecto pudo deberse a acciones de saneamiento en Ocotlán en las descargas domésticas y/o industriales, que sea han mantenido controladas posteriormente.

La buena calidad de agua se extiende hasta el sitio RS4 Macrolibramiento, en donde ya se derivaron los caudales para abasto público del AMG y riego. En este sitio se tienen pocos datos históricos de calidad de agua debido a que es reciente la construcción del puente del macrolibramiento y solamente se cuenta con los resultados obtenidos en este estudio.

Las concentraciones de 12 y 5 mg/l de DBO mostrados en la **Figura 4-13**, no muestra variaciones significativas en las concentraciones con respecto a las obtenidas en Poncitlán o incluso Ocotlán.

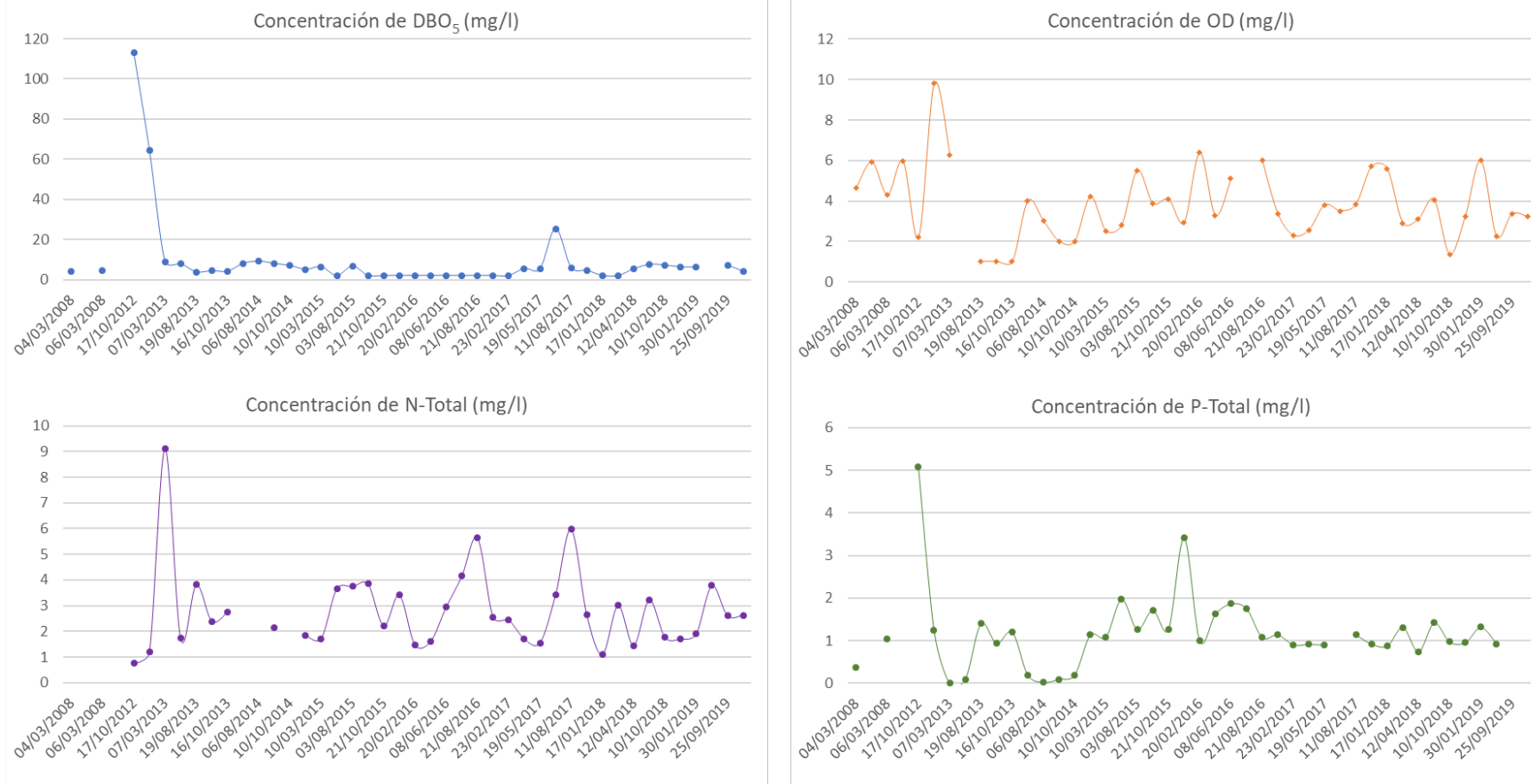
Condiciones similares se observan para los parámetros nitrógeno total y el fósforo, pero son notorias las condiciones de baja velocidad del agua a lo largo del recorrido, desde Ocotlán hasta el Macrolibramiento provocada por una sección grande de río y un muy bajo caudal.

Lo anterior responde a que el escurrimiento promedio (periodo de 25 años) obtenido en la modelación hidrológica es de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, en los meses de estiaje que denota que el caudal ecológico del río Santiago es el último “usuario” de la cuenca Chapala – Santiago, siendo los primeros usuarios del agua que escurre en esta cuenca el mismo Lago de Chapala, el abastecimiento público para el AMG y el distrito de riego, dejando un caudal muy reducido al río Santiago que limita seriamente su capacidad de dilución y a ello se suma una topografía sensiblemente plana que reduce la capacidad de autodepuración del río.

Las condiciones antes mencionadas se traducen en un crecimiento de malezas acuáticas en el cauce del río, como son el lirio y el tule, que generan una condición adversa para la velocidad del río y su oxigenación, pero es una forma natural de autodepuración que se genera por las condiciones que se presentan en este tramo del río, principalmente debido a las plantas acuáticas.



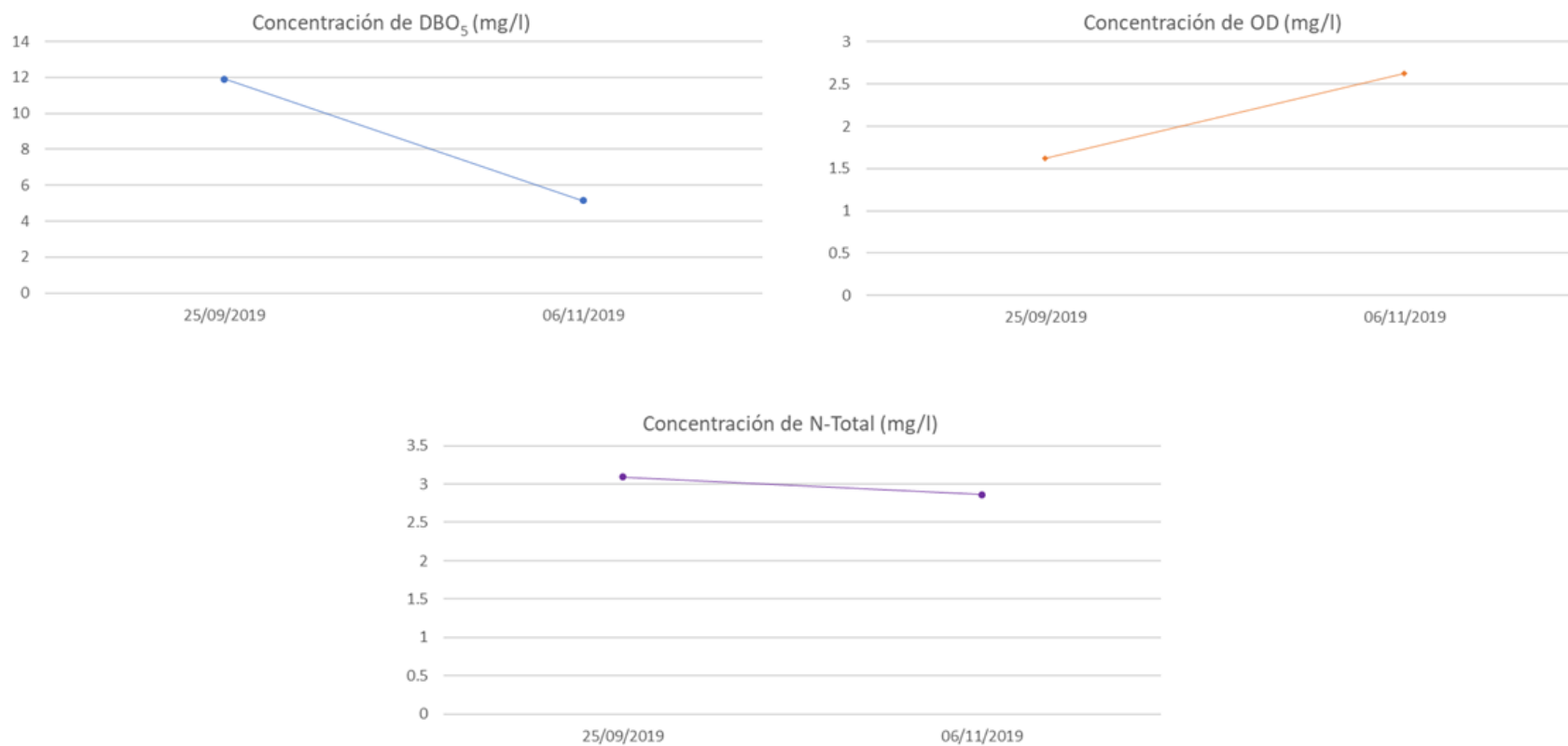
Figura 4-12 Calidad del agua - Sitio RS3 Presa Corona



Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-13 Calidad del agua - Sitio RS4 Macrolibramiento



Fuente: Elaboración propia.



4.3.3 Tercer tramo en la zona de El Ahogado hasta Paso de Guadalupe (A1/A2 a RS9)

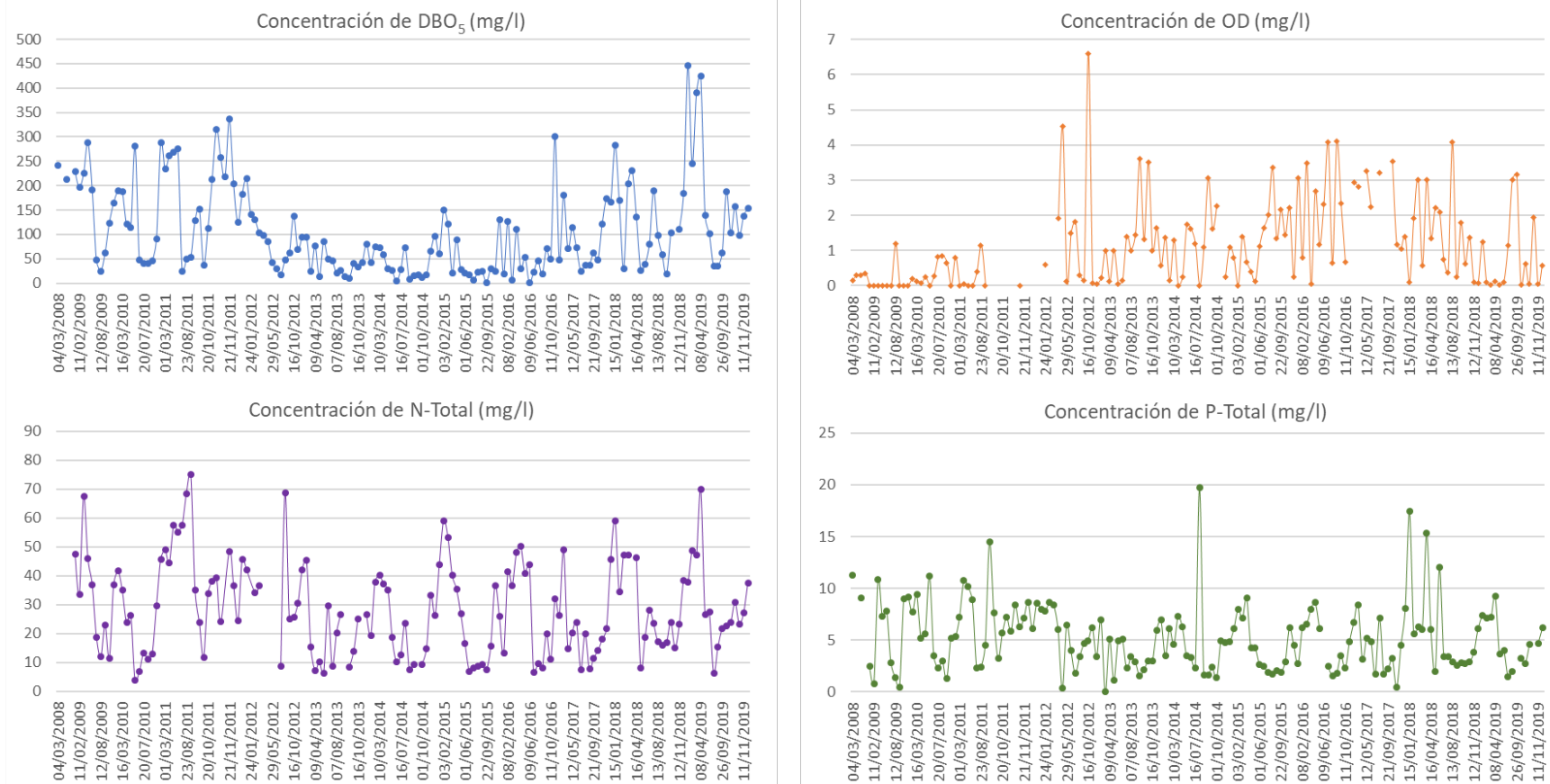
Las condiciones del río en los tramos previos a la aportación de agua del arroyo de El Ahogado son una de las razones por las cuales no existen condiciones de dilución y autodepuración suficientes para asimilar la aportación de materia orgánica procedentes del arroyo de El Ahogado, que es uno de los principales aportadores de contaminación al río Santiago en este tramo.

En la **Figura 4-14**, se muestra el histórico de calidad de agua del arroyo El Ahogado, donde se pueden observar concentraciones de DBO superiores a 100 mg/l hasta antes del año 2012, que denotan un alto grado de contaminación, el cual se fue revirtiendo un poco entre los años 2012 a 2017, aunque posteriormente muestra una tendencia clara al incremento en los últimos dos años.

El comportamiento de la calidad de agua de esta corriente responde a que en el año 2012 se inició la operación de la PTAR El Ahogado, en donde se tratan 2.25 m³/s, que demostró ser una acción importante en el control de la contaminación en esta área. Sin embargo, el crecimiento poblacional del AMG y en especial la cuenca de El Ahogado, superó la capacidad instalada de la PTAR El Ahogado y con ello, al año 2019 muestra un deterioro importante en la calidad de agua de este arroyo.



Figura 4-14 Calidad del agua - Sitio A1 arroyo El Ahogado No.1



Fuente: Elaboración propia.



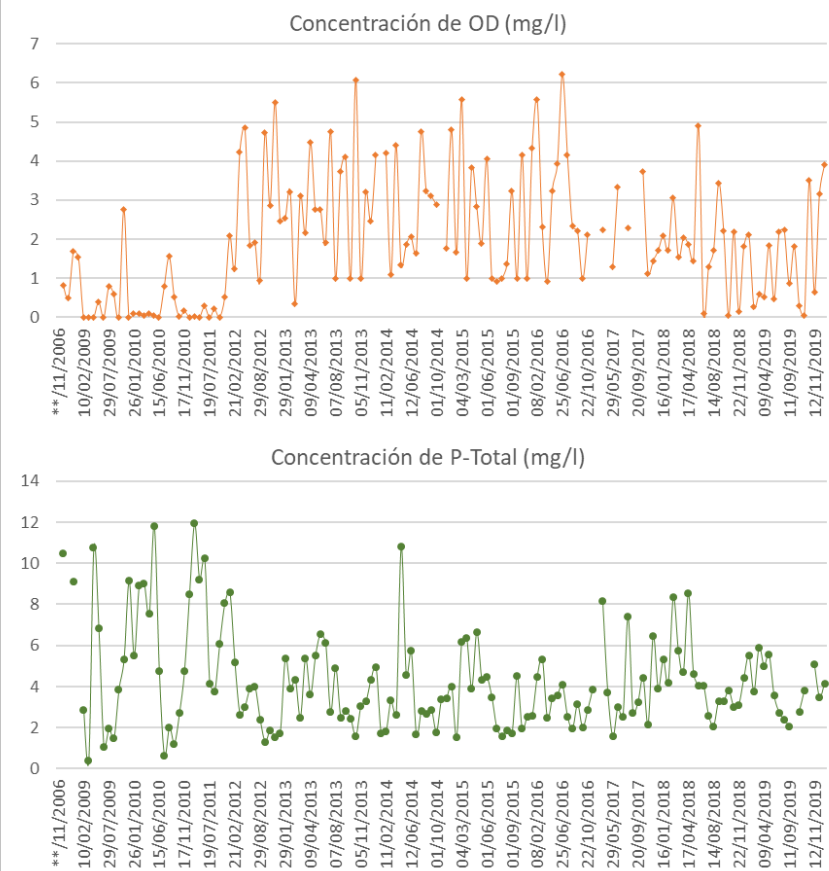
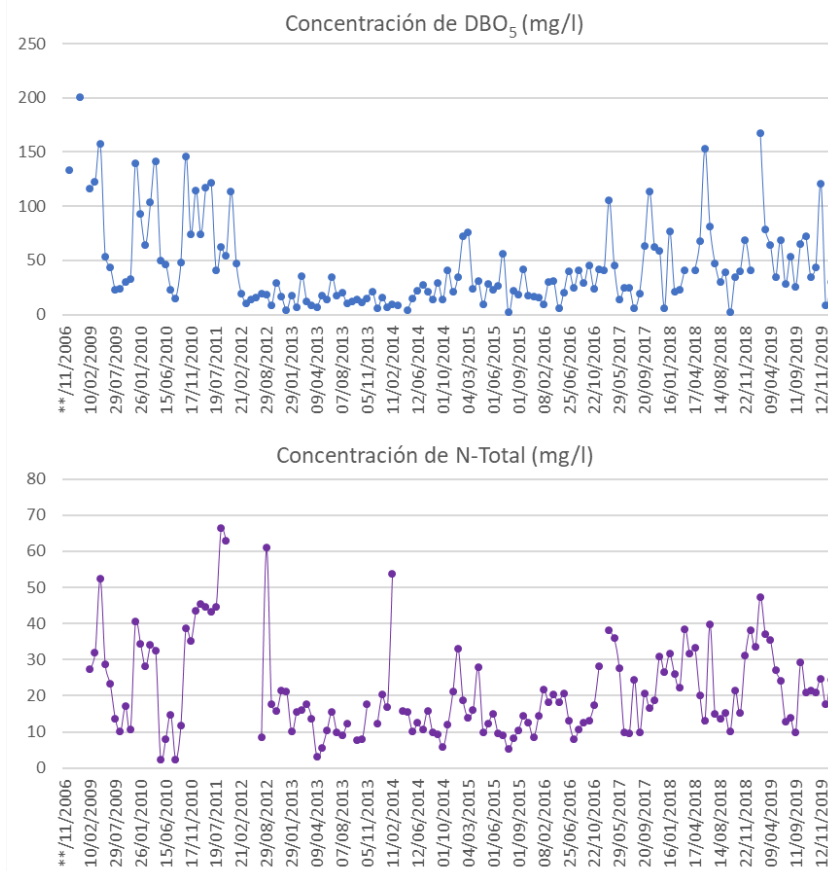
Se debe destacar que el punto A1 arroyo del Ahogado en su cruce con la carretera a Chapala no recibe el agua tratada de la PTAR El Ahogado, pero el efecto de mejora observado a partir del año 2012 muestra los beneficios de las acciones de colección y conducción de las aguas residuales a la PTAR El Ahogado.

Para el caso del sitio A2 ubicado aguas debajo de la descarga tratada de la PTAR El Ahogado, se observan concentraciones inferiores de contaminantes a partir del año 2012 como resultado de los sistemas de colección de aguas residuales aunados al tratamiento en la planta y la autodepuración que se tiene en la presa de El Ahogado; sin embargo, en los últimos años se vuelve a notar un aumento en la DBO posiblemente debido a las descargas sin tratamiento de asentamientos humanos en la zona.





Figura 4-15 Calidad del agua - Sitio A2 arroyo El Ahogado No.2



Fuente: Elaboración propia.



En este tramo se debe tomar en cuenta que el caudal de agua que aporta el arroyo El Ahogado es aproximadamente de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ superior al caudal que conduce el río Santiago que escurre en estiaje $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, esto no es suficiente para alcanzar la dilución que permita mejorar la calidad del agua del arroyo El Ahogado.

Al estar tan limitada la capacidad de dilución del río Santiago en este sitio, el agua que escurre por él no cuenta con el oxígeno suficiente para mantener condiciones aerobias, a lo anterior se suma la degradación anaerobia que se presenta en la represa previa a El Salto de Juanacatlán.

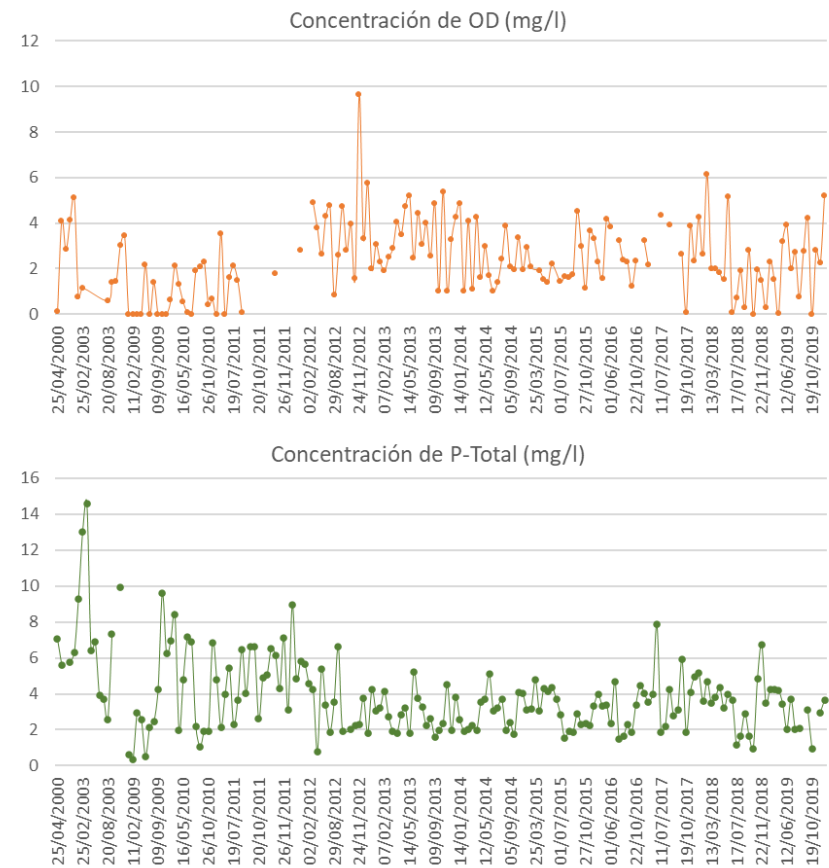
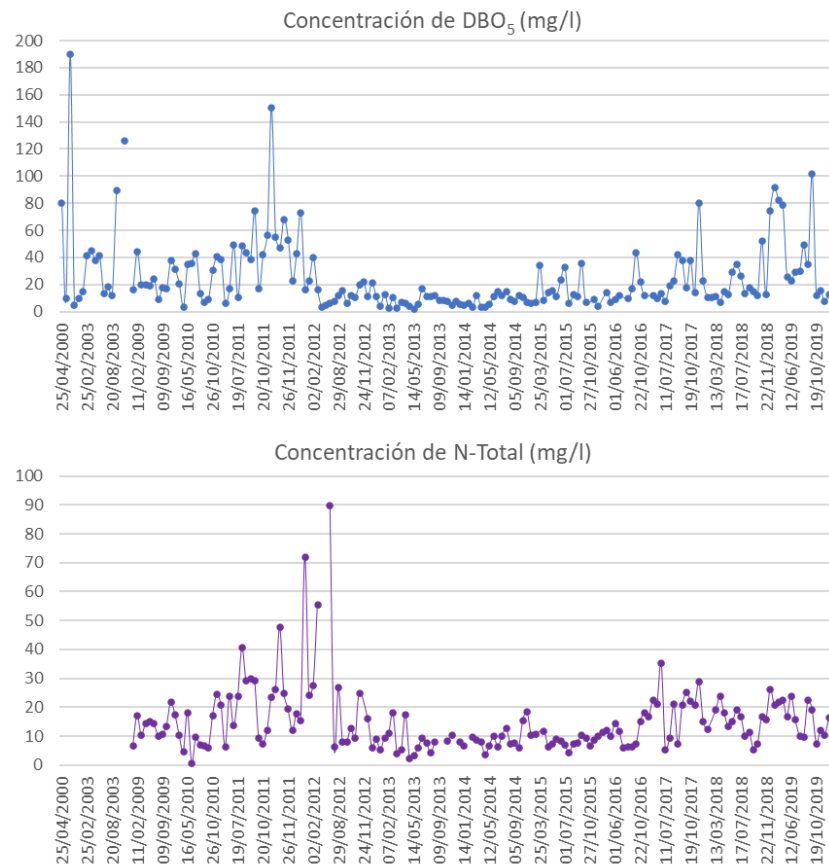
En este sitio se sedimentan los sólidos y se degrada anaeróbicamente una fracción de la materia orgánica presente en el agua, dando como resultado liberación de malos olores y riesgos sanitarios por la mala calidad del agua.

El mejoramiento de la condiciones que presenta el río en esta zona deberán ser estudiadas a detalle con la ayuda de modelos de calidad de agua en la segunda etapa de este estudio con el fin de determinar el nivel de tratamiento que deberán alcanzar las descargas de aguas residuales para que la calidad del agua presente concentraciones de DBO inferiores a 15 mg/l y oxígeno disuelto superior a 3 mg/l , contando así con una calidad aceptable de agua en este tramo del río.

En la **Figura 4-16** se observa el comportamiento al paso del tiempo desde el año 2000 al 2019. Donde puede observarse que la concentración de DBO promedio de periodo ronda los 25 mg/l . Del año 2000 al año 2011 se alcanzaron concentraciones superiores a 25 mg/l , obteniendo un promedio de 40 mg/l , mientras que a partir del año 2012 se aprecia la disminución de la DBO, alcanzando un promedio de 18 mg/l del año 2012 al 2019. Esta disminución en la concentración de DBO se obtiene debido al inicio de la operación de la PTAR El Ahogado, lo cual también refleja la disminución del nitrógeno total a partir del inicio de operación de la PTAR. Sin embargo, se logra apreciar que, a partir del año 2016, se tiene una ligera tendencia al incremento en la concentración de ambos parámetros.



Figura 4-16 Calidad del agua - Sitio RS5 El Salto – Juanacatlán

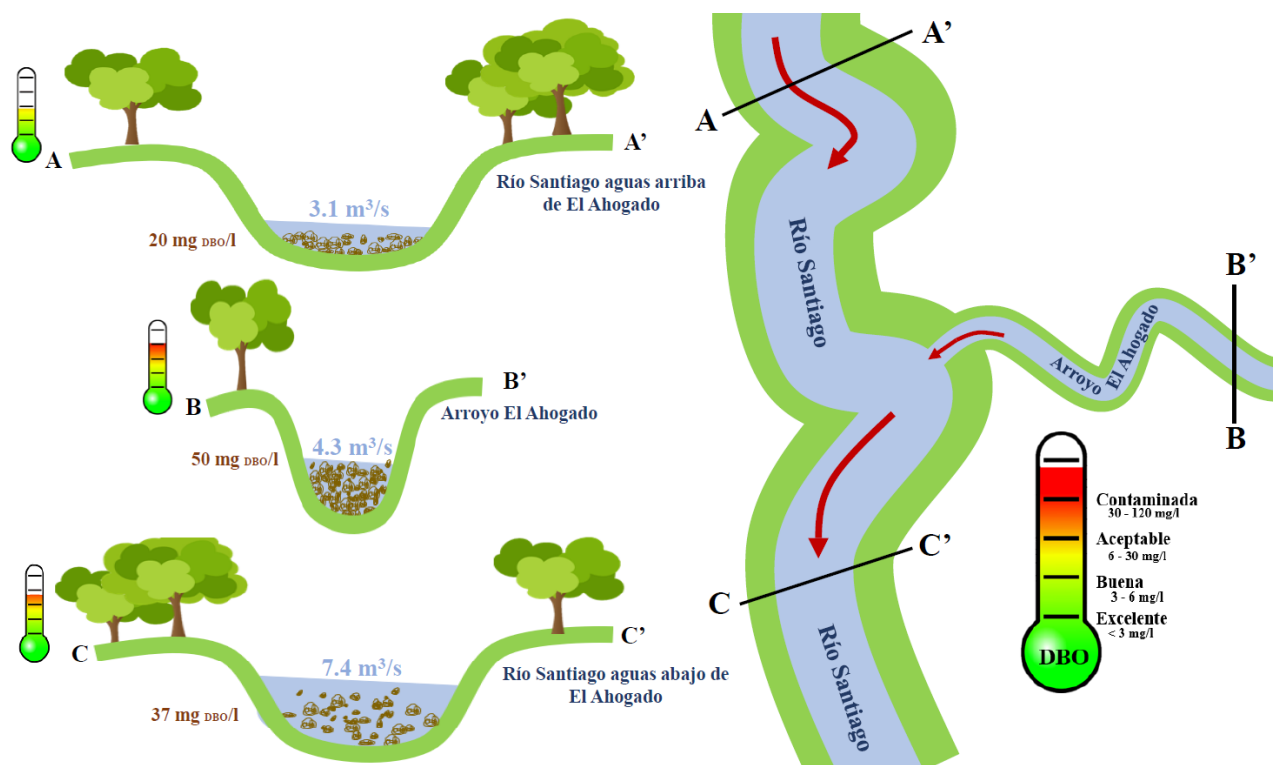


Fuente: Elaboración propia.



En la **Figura 4-17** se muestra de manera ilustrativa el efecto que genera el arroyo El Ahogado en su confluencia con el río Santiago, donde se observa un incremento de un 85% la concentración de DBO aguas abajo a su confluencia. Esto se debe a la alta concentración de la DBO en el arroyo El Ahogado, la cual se ha venido incrementando desde el año 2016. La concentración promedio de DBO en el periodo 2016-2019 alcanza los 47 mg/l, mientras que entre el año 2012 y 2015 la concentración promedio era cercana a los 20 mg/l. Esta condición hace destacar que la capacidad de la PTAR el Ahogado es de 2.25 m³/s, cuando en los aforos realizados en el año 2019 en el arroyo El Ahogado fueron superiores a los 4.3 m³/s con una aportación de aguas residuales domésticas sin tratar.

Figura 4-17 Comportamiento de la DBO en el río Santiago y su afluente El Ahogado

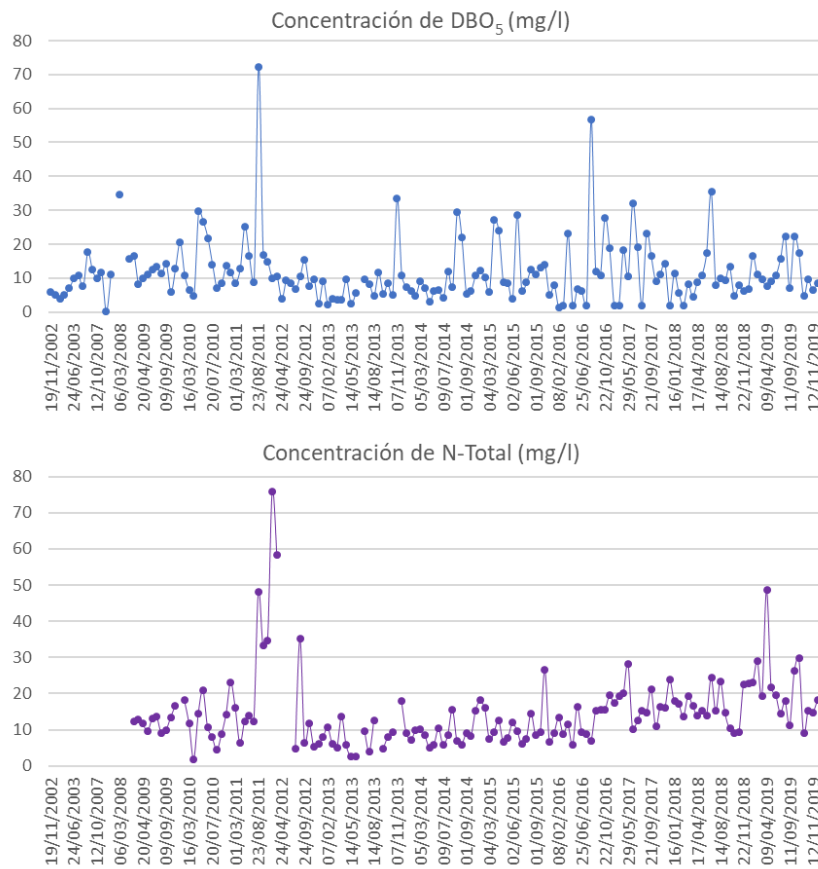


Fuente: Elaboración propia.

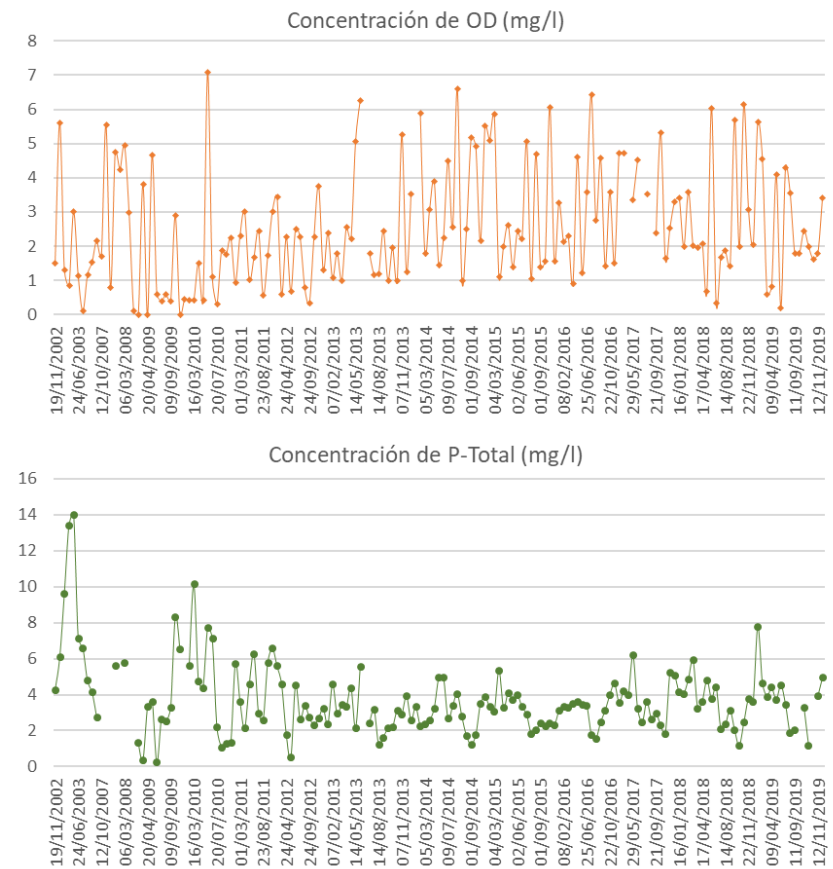
La topografía del río Santiago después de El Salto de Juanacatlán, presenta mayores pendientes y con ello velocidades del agua superiores a las que se presentan en la parte alta de la cuenca. Aunado a esta condición, se presenta un represamiento de las aguas en Juanacatlán, lo que permite una ligera autodepuración que se puede apreciar en el sitio de RS6 Puente Grande (**Figura 4-18**), donde se reduce la concentración de DBO y se incrementa la concentración de oxígeno disuelto, generando condiciones de mejor calidad que en la zona de Juanacatlán en donde en el periodo de 2012 a 2015 se apreciaba una reducción de DBO la que se incrementa posteriormente.



Figura 4-18 Calidad del agua - Sitio RS6 Puente Grande



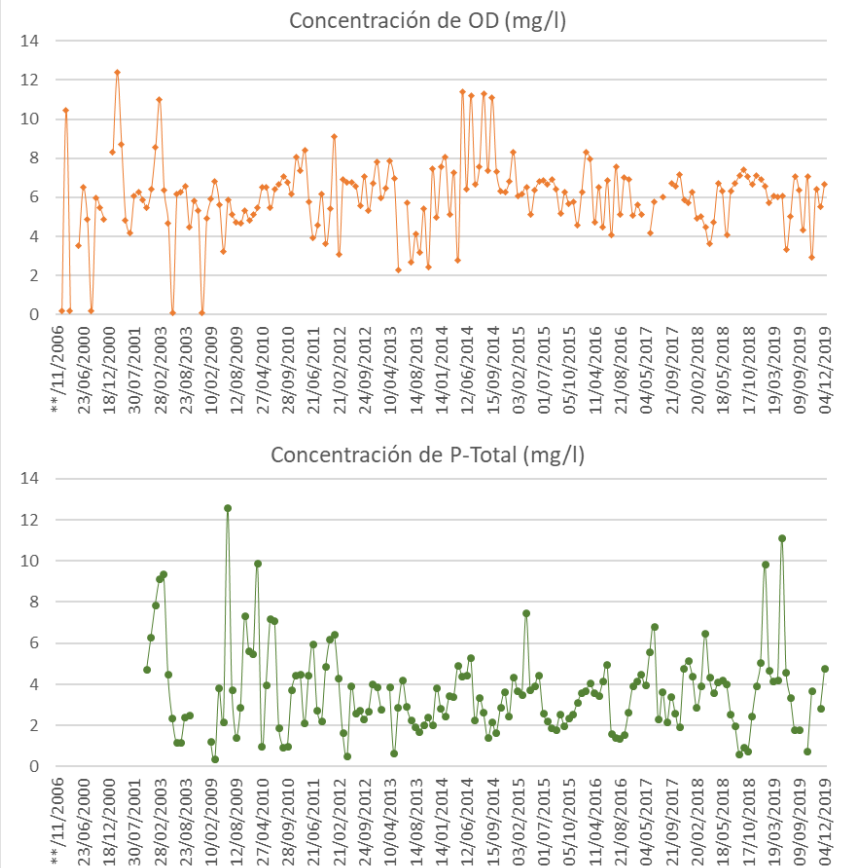
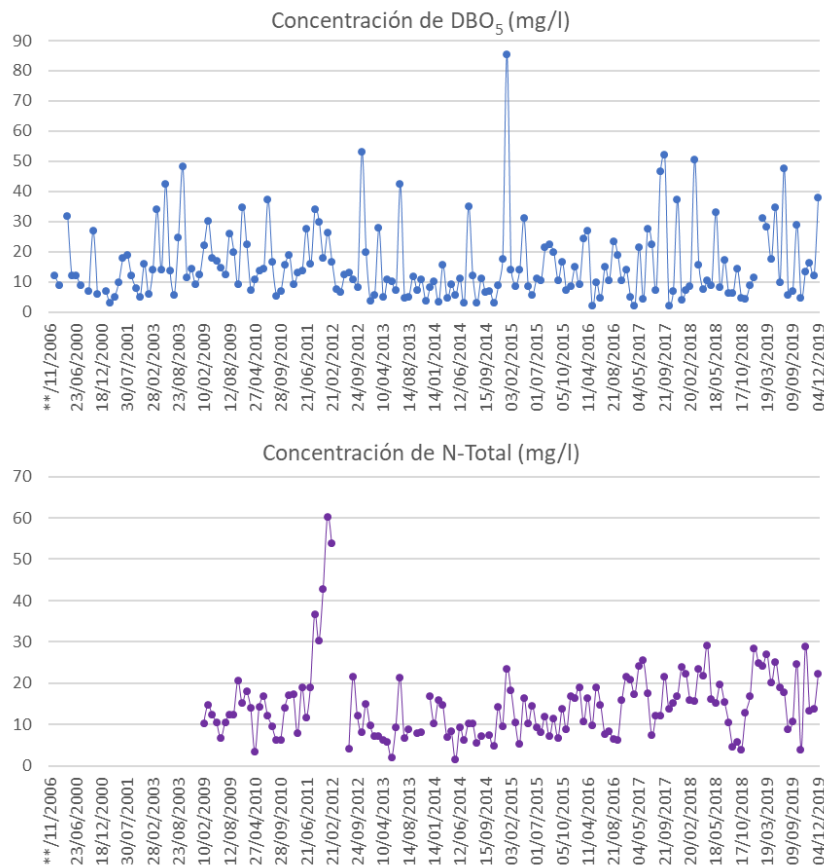
Fuente: Elaboración propia.



La mejoría alcanzada en el tramo de Puente Grande se va deteriorando conforme se acerca al AMG, como es el caso del sitio RS7 Puente Matatlán, para continuar su degradación hasta el punto previo a su confluencia con el río Verde, todo ello ocasionado por las descargas del AMG correspondientes a los colectores denominados Tonalá, San Gaspar, Osorio y San Andrés.



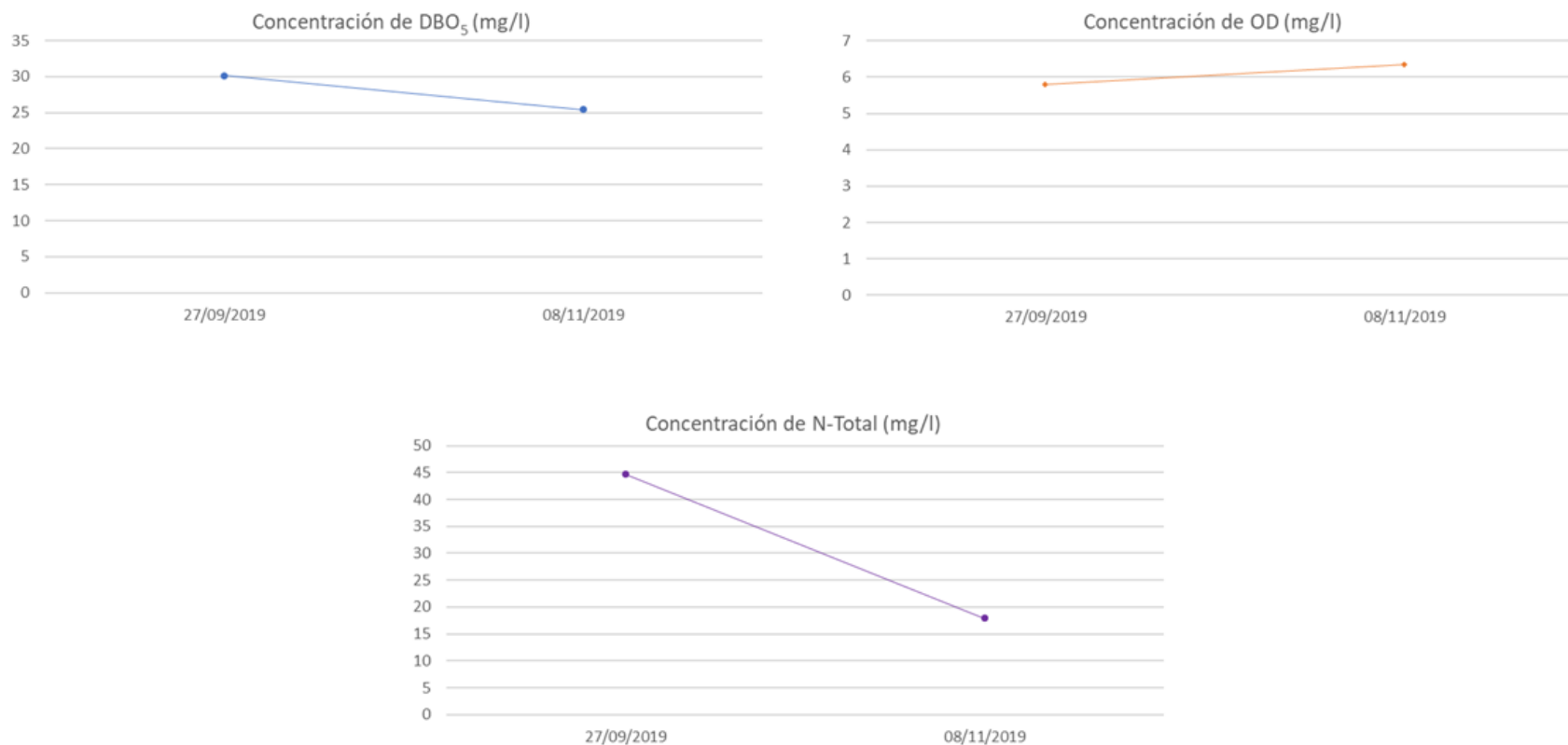
Figura 4-19 Calidad del agua - Sitio RS7 Puente Matatlán



Fuente: Elaboración propia.



Figura 4-20 Calidad del agua - Sitio RS8 aguas arriba río Verde



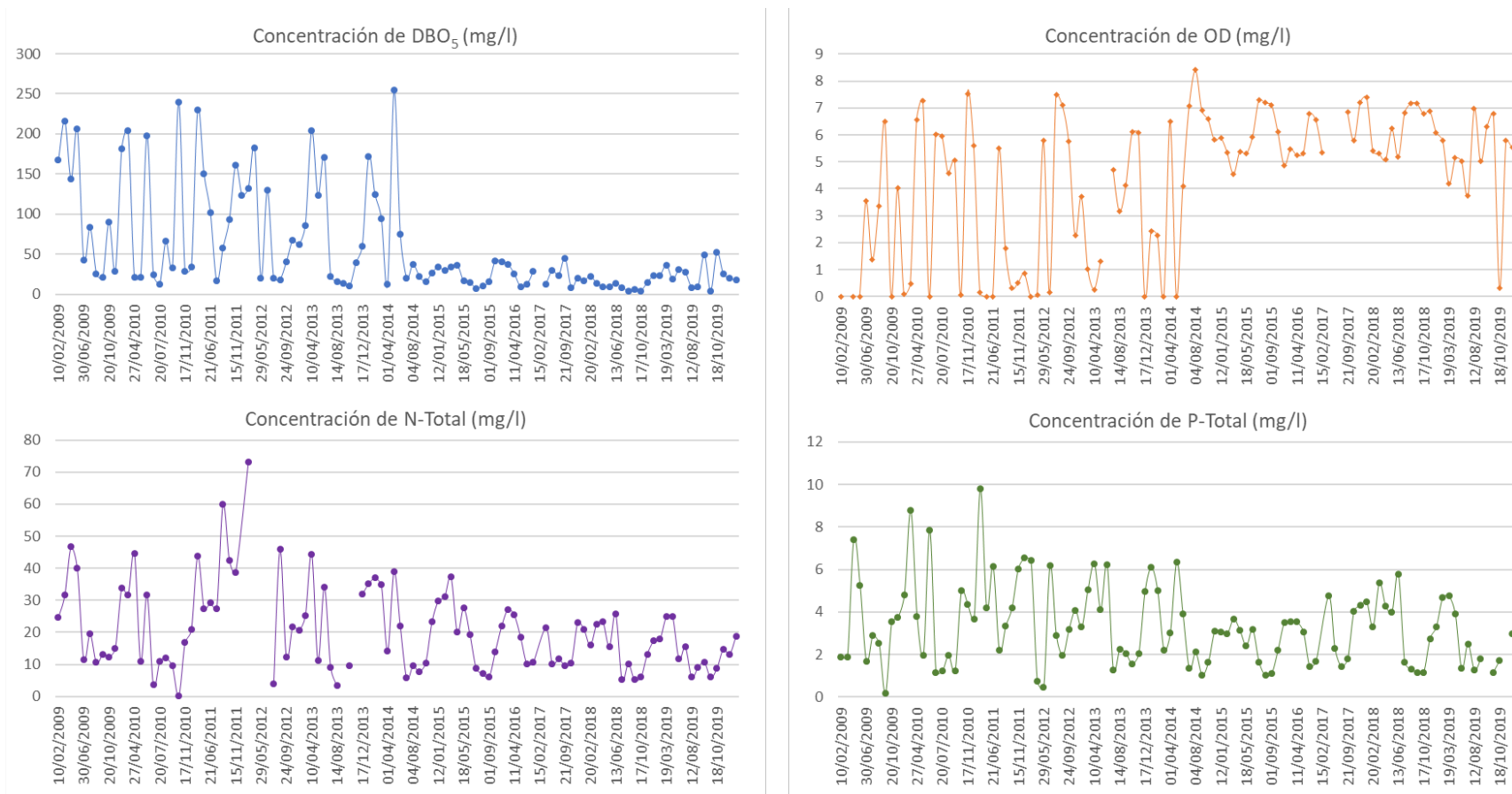
Fuente: Elaboración propia.

Posterior al sitio RS8, se tienen registros históricos en el Puente de Guadalupe RS9, en donde el río Santiago incorpora las descargas de aguas residuales de toda el AMG destacando la descarga de la PTAR Agua Prieta, con un caudal aproximado de 5.5 m³/s, lo que genera una mejoría apreciable a partir del año 2014 en los parámetros de DBO y OD.

En este punto se puede observar los grandes impactos que representan las descargas tratadas y sin tratar del AMG, que corresponde en gran porcentaje al caudal que escurre por el río toda vez que es muy reducido el caudal de aguas naturales que escurre actualmente por él.



Figura 4-21 Calidad del agua - Sitio RS9 Puente Guadalupe



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de la información histórica, es evidente la conveniencia de continuar con el monitoreo de la calidad del agua del río Santiago ligada a los aforos de la corriente y que se siga alimentando la base de datos con esta información, de tal forma que con la ayuda de herramientas de manejo de información, como lo son los sistemas de información geográfica y de bases de datos, así como, modelos hidrológicos y de calidad de agua, se desarrollen políticas de control de la contaminación y con ello se establezcan las prioridades de las acciones a realizar, privilegiando aquellas que obtengan mayores beneficios con la menor inversión posible.