

# Desarrollo de un índice de calidad del agua para el Río Santiago

Cuenca Río Santiago-Guadalajara



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

### **Publicación disponible en libre acceso.**

La utilización, redistribución, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original (© SEMADET) y que las obras que resulten sean publicadas bajo las mismas condiciones de libre acceso.

Esta licencia se aplica exclusivamente al texto de la presente publicación.

### **Derechos de autor en trámite.**

Fotografía de portada: Barranca del Río Santiago.

Crédito de la fotografía de portada: Diana De La Mora Márquez.

Para utilizar cualquier otro material que aparezca en ella (tal como textos, imágenes, ilustraciones o gráficos) y que no pertenezca al dominio público, será necesario pedir autorización a la SEMADET: Av. Circunvalación Agustín Yáñez 2343, Colonia Moderna, 44190 Guadalajara, Jalisco, México. <https://semadet.jalisco.gob.mx/>

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición de parte de la SEMADET en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la SEMDET ni comprometen a la institución.

La SEMADET prioriza la perspectiva de género; sin embargo, para facilitar la lectura se utilizará un lenguaje neutro o se hará referencia a lo masculino o femenino según corresponda a la literatura presentada.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

## **DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO-GUADALAJARA**

### *Reporte técnico*

### **CRÉDITOS**

Este reporte técnico ha sido elaborado con el apoyo de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco, del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco y por la Universidad Nacional Autónoma de México como parte de las sugerencias establecidas en los informes técnicos entregados al Banco Interamericano de Desarrollo en el Marco del proyecto denominado “*Estudio para el establecimiento de la ruta crítica y el modelo conceptual para la elaboración del plan integral para la recuperación del Río Santiago en el Estado de Jalisco*”.

### **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Comisión Estatal de Agua y a la Secretaría de Gestión Integral del Agua del Gobierno del Estado de Jalisco por facilitar los datos de los parámetros físicos, químicos y biológicos de las 13 estaciones de monitoreo de la calidad del agua localizadas en la Cuenca del Río Santiago-Guadalajara para los 11 años analizados. Igualmente, al Banco Interamericano de Desarrollo México por el apoyo económico facilitado para el desarrollo de documentos técnicos que contribuyeron al desarrollo del proyecto estratégico de recuperación integral del Río Santiago.

De igual manera, se agradece el invaluable apoyo del grupo técnico-consultivo en el que participaron activamente el Dr. Javier García Velazco de la Universidad de Guadalajara, Mtra. María Guadalupe Macías Calleja de la Coordinación General Estratégica de Gestión del Territorio, Mtra. Nadia Alejandra Gómez Ayo de la Secretaría de Gestión Integral del Agua, Ocean. Trinidad Martínez Sahagún de la Comisión Estatal del Agua y la Mtra. Sofía Hernández Morales de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Así mismo, se agradece por las gestiones y facilidades otorgadas a Martha Patricia Martínez Barba, titular de la Coordinación General Estratégica de Gestión del Territorio, a Sergio Humberto Graf Montero, titular de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, a Jorge Gastón González Alcérreca, titular de la Secretaría de Gestión Integral del Agua y a Carlos Vicente Aguirre Paczka, Director General de la Comisión Estatal del Agua.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Dr. Misael Sebastián Gradilla Hernández**

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco.

**Biol. Luis Fernando Casillas García**

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Gobierno del Estado de Jalisco.

**Dr. José de Anda Sánchez**

Unidad de Tecnología Ambiental. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.

**Dr. Carlos Yebra Montes**

Universidad Nacional Autónoma de México, ENES- León.

**Cómo citar este documento de acuerdo con las normas de la APA en español.**

Gradilla-Hernández, M.S., Casillas-García, L. F., de Anda-Sánchez, J., y Yebra-Montes, C. (2020). Desarrollo de un índice de calidad del agua para el Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Gobierno del Estado de Jalisco, México, derechos de autor en trámite. <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

## RESUMEN EJECUTIVO

En este documento se presenta el desarrollo utilizado para la obtención del índice de Calidad del Agua del Río Santiago-Guadalajara al cual se le ha denominado ICA-RS. Para el desarrollo del ICA-RS, inicialmente se procesaron los datos para la identificación y eliminación de valores atípicos y sustitución de valores ausentes considerando la distribución de cada una de las variables. Posteriormente se seleccionaron los parámetros con mayor relevancia para la calidad del agua del río (aquellos que explican la mayor variación de la matriz completa de datos) por medio de Análisis de Componentes Principales (ACP). Asimismo, se determinó el porcentaje de las observaciones que exceden los valores permisibles reportados en la Ley Federal de Derechos para la protección de la vida acuática. Entre los parámetros seleccionados mediante el ACP se dio prioridad a aquellos que excedían recurrentemente los valores permisibles estipulados en la Ley Federal de Derechos para la protección a la vida acuática. Una vez que se seleccionaron 17 parámetros (de un total de 44), se desarrollaron las curvas de valoración mediante las que se obtiene una medición estandarizada de 0 a 100 para cada una de las observaciones de los parámetros de calidad de agua. Dichas curvas de valoración se desarrollaron con base en las distribuciones históricas y en consideración de los límites permisibles. A continuación, se establecieron los pesos (ponderación) de cada uno de los parámetros seleccionados para obtener finalmente el valor del ICA-RS por el método aditivo de agregación. Los pesos fueron establecidos mediante métodos estadísticos multivariados (ACP y Análisis de discriminantes) para seleccionar el conjunto de pesos con la mayor capacidad de discriminar entre las estaciones del año y los puntos de muestreo, es decir, se identificó el conjunto de peso que mejor reflejaba las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua del río. Una vez desarrollado el método de cálculo del índice, se elaboraron mapas de color para reflejar, en una escala cromática, la calidad del agua para cada punto de muestreo y en cada tramo del río.

El ICA-RS desarrollado fue comparado con un índice ampliamente usado a nivel internacional, el ICA-NSF, así como con los indicadores sugeridos por la calidad de agua sugeridos por CONAGUA. El análisis aquí desarrollado demuestra que el ICA-RS, a diferencia del ICA-NSF y los indicadores propuestos por CONAGUA, refleja las variaciones temporales y espaciales esperadas en la calidad del agua del río, por lo general asociadas a las oscilaciones típicas del ciclo anual de precipitación pluvial, incluye el rango completo

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

de las concentraciones observadas para cada parámetro en las curvas de evaluación, integra criterios para la protección de la vida acuática basados en la normativa vigente mexicana y considera condiciones particulares del cuerpo de agua (distribución histórica de los datos de calidad de agua). Dichas características lo convierten en una herramienta integral para evaluación la calidad del agua del río, así como facilitar la identificación de los segmentos del río que requieren de mayor atención para su recuperación.

El ICA-RS permite sintetizar grandes matrices de datos en una evaluación numérica que informa, de manera sencilla, las condiciones de calidad del agua del río. Esta herramienta permite comunicar la calidad del agua del río, y su evolución, a todos los sectores sociales aun cuando no sean expertos en calidad de agua. El ICA-RS permite también establecer una línea de base para delimitar con precisión las estrategias que deben implementarse para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del agua y de esta forma alcanzar el estado deseable del río en donde cumpla con las diferentes funciones tanto de ser una fuente de agua para los diferentes usos como para proveer al ecosistema del agua necesaria en cantidad y calidad para el sustento de la biodiversidad.

Aunque la metodología propuesta para el desarrollo y cálculo del ICA-RS es compleja, el algoritmo puede programarse para incorporar nuevos datos del monitoreo y actualizar automáticamente el método de evaluación. Como estrategia para comunicar el estado y la evolución del ICA-RS, se recomienda la creación de una interfase amigable para presentar los resultados en diferentes niveles de desagregación mostrando: (i) el cálculo del ICA-RS a nivel cuenca y para cada una de las estaciones de monitoreo, (ii) cada uno de los indicadores individuales, así como su agregación para obtener valor global del ICA-RS, (iii) los valores mensuales, anuales y la evolución histórica. Se sugiere también desarrollar un menú interactivo para desplegar la información de forma intuitiva y generar una opción para ver en un video la explicación de la metodología de forma sencilla, de tal manera que el proceso sea transparente para la sociedad.

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	Indicadores ambientales .....	9
1.2	Índices ambientales.....	10
1.4	El Índice de Calidad del Agua de la NSF.....	12
1.5	El Índice de Calidad del Agua de la CONAGUA.....	13
2	OBJETIVO GENERAL DE ESTE ESTUDIO .....	17
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1	Preparación de la base de datos .....	17
3.2	Identificación de valores atípicos.....	19
3.3	Selección de parámetros.....	20
3.4	Desarrollo de las curvas de valoración .....	21
3.5	Establecimiento de los pesos de los parámetros.....	22
3.6	Agregación aditiva de indicadores.....	22
3.7	Cálculo del ICA por estación .....	22
3.8	Generación de mapas de color .....	23
4	RESULTADOS .....	24
4.1	Exploración inicial de datos.....	24
4.2	Eliminación de valores atípicos .....	28
4.2.1	Eliminación de datos atípicos evidentes .....	29
4.2.2	Cálculo de mediana acoplada (MC) de cada parámetro de calidad de agua por cada punto de muestreo .....	29
4.2.3	Análisis de las distribuciones sesgadas .....	30
4.2.4	Análisis para distribuciones simétricas (o no sesgadas) .....	30
4.2.5	Estimación de valores ausentes .....	32
4.3	Selección de los parámetros a incluirse en el índice de calidad de agua.....	34
4.4	Desarrollo de las curvas de valoración .....	42
4.4.1	Curvas de valoración desarrolladas por una modificación del procedimiento propuesto por Hallock.....	44
4.4.2	Curvas de valoración desarrolladas con base en las curvas propuestas por la NSF para los parámetros T, pH and OD .....	53
4.5	Determinación de los pesos del índice de calidad del agua.....	59
4.5.1	ACP aplicado a los subíndices de los 17 parámetros seleccionados .....	59

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

4.5.2	Cálculo de 10 conjuntos de pesos potenciales .....	61
4.6	Aplicación del Índice de Calidad de Agua del Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara (ICA-RS).....	67
4.6.1	Mapas de color .....	69
5	DISCUSIÓN.....	72
5.1	Comparación de índices de calidad de agua .....	72
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
7	REFERENCIAS .....	82



## 1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, la expansión de las actividades económicas y la expansión urbana están llevando a una mayor demanda de agua. El uso excesivo de las aguas superficiales y subterráneas está poniendo en peligro numerosos recursos debido a la reducción de las cantidades disponibles y al deterioro de su calidad (Kachroud et al., 2019).

El deterioro de la calidad del agua superficial se está convirtiendo en un problema grave en muchos países y el monitoreo de la calidad del agua se encuentra entre las principales prioridades en la política de protección de recursos. Por lo tanto, recientemente los países en desarrollo han intensificado los esfuerzos para evaluar la calidad de los ríos (Kachroud et al., 2019).

Debido a las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua, que a menudo son difíciles de interpretar, es necesario monitorear la composición de las aguas en diferentes puntos y de manera continua. Las fuentes de contaminación son diversas: contaminación urbana, industrial y agrícola (fuentes difusas o puntuales). La evaluación de la calidad del agua es un requisito previo para la implementación de políticas de protección del agua y la asignación óptima de diferentes fuentes para los diferentes usos. De hecho, el agua superficial a menudo se ha evaluado utilizando normas que presentan valores de referencia., (Kachroud et al., 2019).

La frecuencia de monitoreo y evaluación de la calidad del agua ayuda a desarrollar estrategias de gestión para controlar la contaminación de las aguas superficiales frente a la creciente urbanización y la presión antropogénica sobre los recursos hídricos (Kachroud et al., 2019). Ante esta situación, los indicadores de calidad del agua y los índices compuestos de calidad del agua se reconocen cada vez más como una herramienta útil para la formulación de políticas y la comunicación pública dado que permiten transmitir información sobre la salud ambiental de los ecosistemas de agua dulce (ríos, lagos, presas, acuíferos, etc.). Al permitir la visualización de fenómenos y destacar tendencias, los índices de calidad del agua simplifican, interpretan y comunican información que de otra manera sería compleja.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Los profesionales de los recursos hídricos por lo general comunican el estado y las tendencias de la calidad del agua en términos de la evaluación de los parámetros individuales de la calidad del agua (e. g. DQO y SST) (Cude, 2001). Si bien este lenguaje técnico se entiende fácilmente dentro de la comunidad de expertos, no se traduce fácilmente para otros sectores que tienen una profunda influencia en las políticas para el manejo de dichos recursos: el público en general y los responsables de generar las políticas para el manejo sustentable de los recursos hídricos (Cude, 2001).

Debido a que las comunidades afectadas por las consecuencias ambientales de la contaminación esperan una respuesta comprensible a su derecho a saber sobre el estado de su entorno, es indispensable generar una herramienta de comunicación basada en indicadores e índices ambientales a fin de facilitar la comunicación entre las partes interesadas.

## **1.1 Indicadores ambientales**

El término indicador ambiental se puede definir de diferentes maneras. Se pueden describir como “medidas físicas, químicas, biológicas o socioeconómicas que mejor representan los elementos clave de un ecosistema o de un tema ambiental” (Saunders et al., 1998; Olander, 2018). Un indicador en ecología y planificación ambiental se define como un componente o una medida de fenómenos ambientalmente relevantes utilizados para representar o evaluar las condiciones o cambios ambientales o para establecer objetivos ambientales (Heink y Kowarik, 2010).

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico define un indicador como “un parámetro o un valor derivado de parámetros, que sugiere, proporciona información acerca de, o describe el estado de un fenómeno, el medio ambiente o un área, con un significado que se extiende más allá del que está directamente vinculado con el valor de un parámetro” (OCDE, 2003). Asimismo, la CONAGUA (2018) menciona que los indicadores son variables que brindan información sobre la condición y tendencia de atributos ambientalmente importantes en un sistema; susceptibles de ser calculados e interpretados numéricamente.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Por lo tanto, los indicadores ofrecen una visión de las condiciones y presiones ambientales y respuestas de la sociedad o gobierno, son sencillos, fáciles de interpretar y capaces de mostrar las tendencias temporales, responden a cambios en el ambiente y las actividades humanas relacionadas, proporcionan una base para las comparaciones internacionales y son aplicables a escala nacional o regional. Todas estas características hacen que sean útiles para monitorear las condiciones en las que se encuentran los ecosistemas acuáticos (iAgua, 2020).

Cabe señalar que los indicadores de calidad de agua no integran la información que proporcionan diferentes parámetros de calidad de agua, sino que interpretan y comunican la información de un parámetro único. Por tales motivos, a menudo resultan insuficientes para dar una evaluación integral de la calidad de un cuerpo de agua.

## 1.2 Índices ambientales

A diferencia de los indicadores, un índice ambiental es la combinación de múltiples fuentes de información (es decir, indicadores de respuestas ecológicas) sobre un sistema ambiental (por ejemplo, una corriente fluvial, un lago o una presa) a partir de atributos potencialmente variables de ese sistema (por ejemplo, procesos de flujo interno, procesos ecológicos, riqueza de especies, vegetación ribereña, etc.). Los índices ambientales generalmente se desarrollan para proporcionar una evaluación general de alguna característica del sistema ambiental, pero también se utilizan para comparar sistemas ambientales similares. La construcción de un índice ambiental requiere una cuidadosa consideración de varios aspectos importantes de los indicadores ambientales individuales que contribuyen a éste, a saber (Dobbie y Dail, 2013):

- Definir un marco teórico para apoyar la selección de indicadores;
- Preparación de datos;
- Estandarización de los indicadores potencialmente dispares para que puedan combinarse fácilmente en un índice;
- Ponderación y agregación de los indicadores individuales; y
- Robustez y sensibilidad de las decisiones tomadas en la construcción de un índice ambiental.

### 1.3 Índices de Calidad del Agua

Un índice de calidad del agua (ICA) es un número único adimensional que expresa la calidad del agua de forma simple al agregar las mediciones de los parámetros seleccionados (Sutadian et al., 2016).

Los pioneros en generar una metodología a unificada para el cálculo del índice de calidad (ICA) fueron Horton en el año 1965 y Liebman en 1969. Sin embargo, estos solo fueron utilizados y aceptados por las agencias de monitoreo de calidad del agua en los años setenta cuando los ICA tomaron más importancia en la evaluación del recurso hídrico. El índice general de calidad del agua fue desarrollado por Brown et al. en el año 1970 y mejorado por Deininger para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos en 1975 (citados por Samboni-Ruiz et al., 2007).

Desde entonces se han realizado esfuerzos en todo el mundo para generar índices de calidad de agua que representen, de forma satisfactoria, las tendencias de los ecosistemas de agua dulce (Lumb et al., 2011; Tyagi et al., 2013; Kachroud et al., 2019). Dentro de los índices más relevantes se pueden citar el de la Fundación Nacional de Saneamiento (ICA-NSF o NSF-WQI por sus siglas en inglés) (Brown et al., 1970; Landwehr et al., 1974; Tyagi, et al., 2013), el del Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente para la protección de la vida acuática (CCME-WQI, por sus siglas en inglés) (Saffran et al., 2001; Tyagi, et al., 2013), el de Oregón (Cude, 2001; Tyagi, et al., 2013) el de Said (2004). Aplicando el método de la CCME-WQI, Contreras-Dávila et al. (2013) publicaron por primera vez un ICA para el Río Santiago encontrando condiciones de calidad del agua clasificada en el rango de pobre e incompatible para el uso humano. Más recientemente Gradilla et al. (2020) desarrollaron una metodología para calcular índices de calidad del agua ecosistema-específicos. Esta metodología fue aplicada para el caso de la laguna de Cajititlán en el estado de Jalisco. Este trabajo demuestra que hay diferencias importantes en los resultados de los ICAs desarrollados para cuerpos de agua templados y los que surgen como resultado de las condiciones bióticas y abióticas particulares de los cuerpos de agua localizados en latitudes tropicales y subtropicales.

El objetivo de estos índices ha sido mejorar la comprensión de los problemas de calidad del agua mediante la integración de datos complejos y generar una puntuación que describa

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

el estado de la calidad del agua y evalúe las tendencias de la calidad del agua. Aunque se pierde parte de la información al integrar múltiples parámetros de calidad del agua, esta pérdida se ve compensada por el aumento en la comprensión de los problemas de calidad del agua por parte del público y los responsables de elaborar e implementar las políticas públicas en la materia. Una mayor comprensión por parte de los administradores de los recursos hídricos se traduce en una toma de decisiones más asertiva en el manejo del recurso (Cude, 2001).

#### 1.4 El Índice de Calidad del Agua de la NSF

En los años 1970 la *National Sanitation Foundation* (NSF), desarrolló un índice de calidad de agua (ICA-NSF) basándose en la metodología Delphi. Dicho índice incluye nueve parámetros: DBO<sub>5</sub>, OD, coliformes fecales, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pH, cambio de temperatura, SDT, fósforo total y turbiedad (Brown et al., 1970; Landwehr et al., 1974). Este índice es en la actualidad uno de los más utilizados por agencias e instituciones en los Estados Unidos. En la tabla 1 se muestran las variables seleccionadas para este índice y su valor de ponderación (pesos). Una vez calculado el ICA de la NSF se califica la calidad del agua de acuerdo con los criterios mostrados en la tabla 2.

**Tabla 1.** Parámetros del ICA de la NSF (Abbasi y Abbasi, 2012).

Parámetros incluidos en el ICA-NSF	Pesos ( $W_i$ )
Oxígeno disuelto	0.17
Coliformes fecales	0.16
pH	0.11
Demanda bioquímica de oxígeno	0.11
Cambio de temperatura	0.10
Fósforo total	0.10
Nitratos	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos totales	0.07

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 2.** Clasificación de la calidad del agua de acuerdo con los criterios del ICA-NSF (Gradilla-Hernández et al., 2020).

Nivel	Rango de valores del ICA-NSF	Calificación de la calidad del agua	Protección de la vida acuática	Usos recreativos
1	91 - 100	Excelente	Biodiversidad alta	Completamente utilizable
2	71 - 90	Buena	Biodiversidad alta	Muy pocas limitantes
3	51 - 70	Media	Algo de estrés	Uso con precaución
4	26 - 50	Mala	Biodiversidad baja	Contacto directo limitado
5	0 - 25	Muy mala	Biodiversidad muy limitada	Contacto directo restringido

### 1.5 El Índice de Calidad del Agua de la CONAGUA

A principios de los años setenta, en México, se desarrolló un Índice de Calidad del Agua (ICA) ante la necesidad de encontrar un método uniforme y consistente para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población (SEMARNAT, 2019). Este índice permitía conocer el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo hacer comparaciones de los niveles de contaminación en diferentes regiones del país y en diferentes cuerpos de agua. Este índice consideró originalmente 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos ( $W_i$ ), según la importancia que se le concedía a cada uno de ellos en la evaluación total (SEMARNAT, 2019). La tabla 3 muestra los parámetros seleccionados y los pesos elegidos para ICA desarrollado por la SEMARNAT (2019). Sin embargo, no se presentaron las curvas de evaluación, por lo que es imposible calcular el valor del ICA.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 3.** Parámetros del Índice de Calidad del Agua de la CONAGUA (SEMARNAT, 2019).

Parámetro del ICA-CONAGUA	Peso ( $W_i$ )	Parámetro del ICA-CONAGUA	Peso ( $W_i$ )
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5	Nitrógeno en nitratos	2
Oxígeno disuelto	5	Alcalinidad	1
Coliformes fecales	4	Color	1
Coliformes totales	3	Dureza total	1
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3	Potencial de Hidrógeno (pH)	1
Conductividad eléctrica	2	Sólidos suspendidos	1
Fosfatos totales	2	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2	Turbiedad	0.5

A lo largo de estas décadas, el crecimiento poblacional y principalmente el crecimiento industrial ha impactado los cuerpos de agua con sus descargas, las cuales vierten una serie de contaminantes tóxicos, tales como los metales pesados y los compuestos orgánicos, que no estaban considerados en el ICA, por lo que la evaluación que se propuso con dicho índice resulta parcial y no necesariamente corresponde a la realidad (SEMARNAT, 2019).

Por lo anterior, en sustitución del ICA, se ha decidido utilizar algunos parámetros como indicadores para evaluar la calidad del agua, que muestren la influencia humana desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales que por sus características producen desechos líquidos de calidad diferenciable (SEMARNAT, 2019).

Entre esos parámetros están la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (figura 1). La  $DBO_5$  y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

municipal y no municipal. Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales (SEMARNAT, 2019).

La  $DBO_5$  determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad de materia orgánica químicamente degradable. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos (SEMARNAT, 2019).

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipal, así como áreas con deforestación severa (véase en la tabla 4) (SEMARNAT, 2019).

No se omite mencionar que esto no impide llevar a cabo evaluaciones de calidad del agua con otros parámetros, como pueden ser presencia de metales pesados o compuestos orgánicos (SEMARNAT, 2019).

**Tabla 4.** Escalas de clasificación de la calidad del agua para la  $DBO_5$ , DQO y SST de acuerdo con los criterios de la CONAGUA (SEMARNAT, 2019).

Parámetro	Criterio mg/l	Clasificación	Color
$DBO_5$	$DBO_5 \leq 3$	<b>Excelente</b> (No contaminada)	Azul
	$3 < DBO_5 \leq 6$	<b>Buena calidad</b> (Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable)	Verde
	$6 < DBO_5 \leq 30$	<b>Aceptable</b> (Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente)	Amarillo
	$30 < DBO_5 \leq 120$	<b>Contaminada</b> (Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal)	Naranja



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

	$DBO_5 > 120$	<b>Fuertemente contaminada</b> (Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales)	Rojo
DQO	$DQO \leq 10$	<b>Excelente</b> (No contaminada)	Azul
	$10 < DQO \leq 20$	<b>Buena calidad</b> (Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable)	Verde
	$20 < DQO \leq 40$	<b>Aceptable</b> (Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente)	Amarillo
	$40 < DQO \leq 200$	<b>Contaminada</b> (Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal)	Naranja
	$DQO > 200$	<b>Fuertemente contaminada</b> (Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales)	Rojo
SST	$SST \leq 25$	<b>Excelente</b> (Clase de excepción, muy buena calidad)	Azul
	$25 < SST \leq 75$	<b>Buena calidad</b> (Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto)	Verde
	$75 < SST \leq 150$	<b>Aceptable</b> (Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido)	Amarillo
	$150 < SST \leq 400$	<b>Contaminada</b> (Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Aguas con alto contenido de material suspendido)	Naranja
	$SST > 400$	<b>Fuertemente contaminada</b> (Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces)	Rojo

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

## **2 OBJETIVO GENERAL DE ESTE ESTUDIO**

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un índice específico de calidad del agua para el Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara (ICA-RS) apropiado para las condiciones locales, basadas en la distribución de datos históricos de monitoreo, evaluar su capacidad para explicar las características de calidad del agua, y describir las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua del río Santiago-Guadalajara.

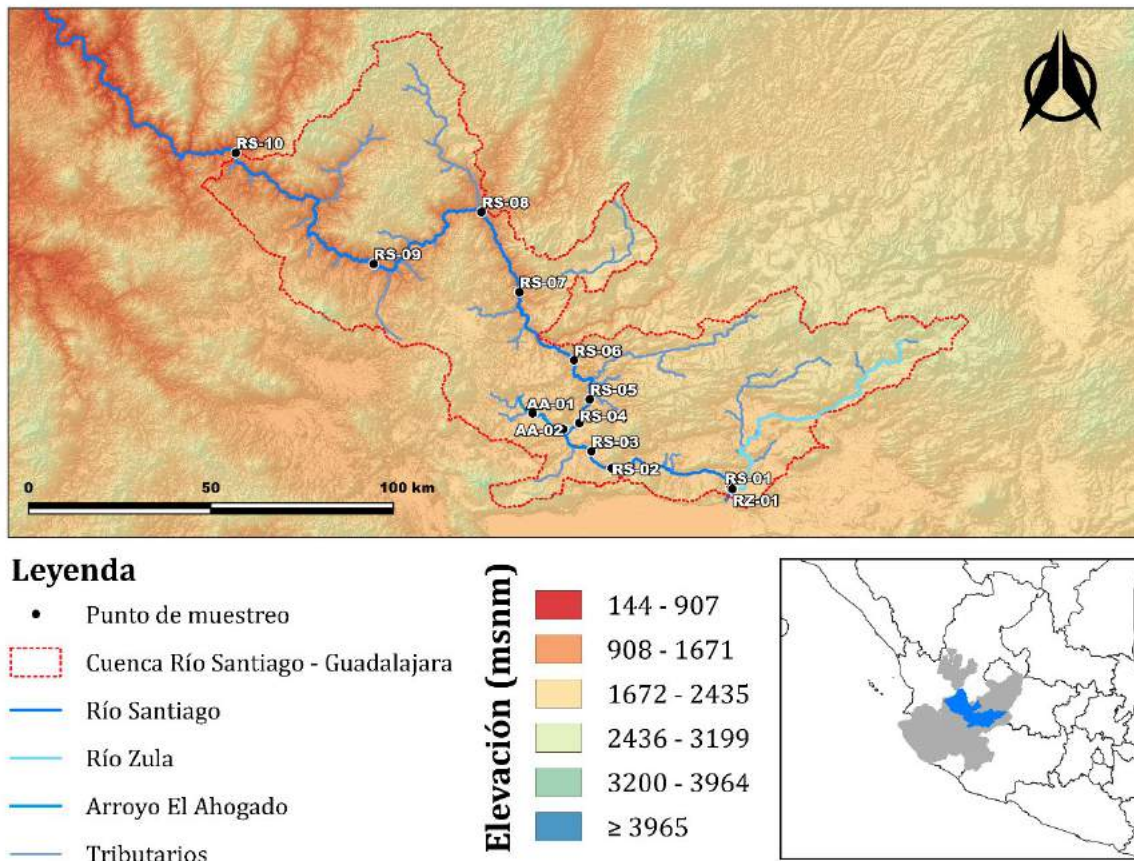
## **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Preparación de la base de datos**

Desde el año 2009 el Laboratorio de Calidad del Agua de la Comisión Estatal del Agua del Gobierno del Estado de Jalisco (CEA Jalisco) ha venido monitoreando de forma mensual 44 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua en 13 estaciones localizadas en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara (ver figura 1). Los resultados del monitoreo se reportan regularmente en el Sistema de Calidad del Agua de la CEA Jalisco (2020). La finalidad del monitoreo es establecer cuáles parámetros exceden los límites establecidos por la Ley Federal de Derechos de acuerdo con el uso al que se tenga establecido para el agua del río (LFD, 2019).

La base de datos de la CEA Jalisco se organizó en una tabla del programa Excel de Microsoft® a fin de facilitar el análisis estadístico mediante la herramienta de software RStudio (2020).

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 1.** Localización de las 13 estaciones de monitoreo en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara (Fuente: elaboración propia con información de CGEGT, 2020).

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 5.** Coordenadas y altitud de los puntos de monitoreo.

Estación	Descripción	Altitud (msnm)	Coordenadas geográficas
RZ-01	Puente de la carretera Guadalajara – La Barca	1,531	20°20'39.7"N 102°46'29.5"W
RS-01	Ocotlán	1,529	20°20'48.9"N 102°46'45.8"W
RS-02	Cortina Presa Corona - Poncitlán	1,527	20°23'58.8"N 103°05'26.2"W
RS-03	Ex Hacienda Zapotlanejo	1,512	20°26'31.2"N 103°08'37.7"W
AA-01	Carretera a Chapala antes del aeropuerto	1,526	20°32'16.2"N 103°17'48.1"W
AA-02	Puente de Localidad El Muelle	1,513	20°29'52.3"N 103°13'00.2"W
RS-04	Compuerta Puente El Salto – Juanacatlán	1,510	20°30'46.2"N 103°10'28.4"W
RS-05	Puente Grande	1,450	20°34'15.7"N 103°08'50.2"W
RS-06	Vertedero controlado de Matatlán	1,244	20°40'05.8"N 103°11'13.8"W
RS-07	Paso de Guadalupe	905	20°50'20.8"N 103°19'44.3"W
RS-08	San Cristóbal de la Barranca	816	21°02'18.1"N 103°25'33.7"W
RS-09	Camino El Salvador - Tequila	659	20°54'43.6"N 103°42'43.1"W
RS-10	Puente Analco (Hostotipaquillo – Tequila)	421	21°11'24.4"N 104°04'23.0"W

### 3.2 Identificación de valores atípicos

El primer análisis estadístico realizado fue la identificación y eliminación de datos atípicos en la serie temporal de cada parámetro de calidad del agua. Los valores atípicos son datos que son sustancialmente diferentes del resto (Díaz-Muñiz et al., 2012; Robinson et al., 2005).

Con el propósito de identificar datos atípicos evidentes (aquellos valores que no pertenecen al rango observable de los parámetros y que usualmente se deben a un registro erróneo y los datos atípicos potenciales (aquellos que no son evidentemente valores atípicos pero que se encuentran fuera de los diagramas de caja), se llevó a cabo una

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

exploración inicial del conjunto de datos por medio de resúmenes estadísticos, series temporales, histogramas y diagramas de caja por punto de muestreo.

La metodología propuesta por Hubert y Vandervieren (2008) se utilizó para detectar valores atípicos para distribuciones asimétricas, con base en un diagrama de caja y bigote ajustado. Una vez que se detectaron los valores atípicos, se eliminaron del conjunto de datos. Finalmente, para sustituir los valores eliminados, se ajusta una curva a cada parámetro y punto de muestreo del conjunto de datos restante. Se crean nuevos valores interpolando entre los valores eliminados (Gradilla-Hernández et al., 2020).

### **3.3 Selección de parámetros**

La selección de parámetros es esencial para el desarrollo de un ICA, los parámetros seleccionados son los principales constituyentes de un índice (Sutadian et al., 2017, 2018; Khalil et al., 2010, 2014). Para seleccionar los parámetros que constituyen el nuevo ICA, se llevó a cabo un procedimiento de detección inicial para excluir los parámetros que no cumplieran con los criterios mínimos de datos, como propusieron Sutadian et al. (2018) Después de la etapa de selección, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) de cada uno de los diferentes grupos de parámetros de calidad del agua: (i) físico, (ii) agotamiento de oxígeno, (3) nutrientes, (iv) orgánicos, (v) metales pesados, (vi) iones y minerales, y (vii) microbiología (Sutadian et al., 2018), para evaluar la redundancia de parámetros e identificar otros parámetros que se excluirán del índice sin perder una cantidad sustancial de información que represente la calidad del agua (Khalil et al.2010; Sutadian et al., 2018).

Por otra parte, se determinó el porcentaje de las observaciones que exceden los valores permisibles reportados en la Ley Federal de Derechos para la protección de la vida acuática. Entre los parámetros seleccionados mediante el ACP se dio prioridad a aquellos que excedían recurrentemente los valores permisibles. En la tabla 6 se muestran los valores permisibles de dichos parámetros en la Ley Federal de Derechos (LFD, 2019) para la protección de la vida acuática.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 6.** Valores permisibles para la protección de la vida acuática en la Ley Federal de Derechos (LFD, 2019).

Parámetro	LFD 2019
Temperatura del agua (°C)	NC + 1.5
Potencial de hidrógeno (UpH)	6.5 - 8.5
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l)	30.00
Oxígeno disuelto (mg/l)	5.00
Sólidos disueltos totales (mg/l)	500.00
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	30.00
Grasas y aceites (mg/l)	10.00
Nitrógeno de nitratos (mg/l)	0.04
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	0.06
Fluoruros (mg/l)	1.00
Sulfuros (mg/l)	0.02
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	1,000
Cadmio (mg/l)	0.004
Cromo (mg/l)	0.05
Mercurio (mg/l)	0.0005
Plomo (mg/l)	0.03
Zinc (mg/l)	0.02

### 3.4 Desarrollo de las curvas de valoración

Una vez seleccionados los parámetros, para cada uno de ellos se desarrolló una curva de valoración que asigna un valor entre 0 (muy mala calidad) y 100 (excelente calidad) a las observaciones de calidad de agua. Para el desarrollo de las curvas de valoración de 14 (14/17) de los parámetros seleccionados (DBO<sub>5</sub>, CF, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SDT, SST, NH<sub>3</sub>-N, GYA, Pb, Zn, Cr, Cd, F, SUL y Hg) se utilizó el método de Hallock (2012) con una modificación aquí propuesta para incorporar los límites máximos permisibles presentados en la Ley Federal de Derechos considerando los criterios para la protección a la vida acuática. Este método y la modificación propuesta se explican a detalle en una sección subsecuente. Las curvas desarrolladas por la NSF para pH y OD fueron modificadas para que incorporaran los límites máximos permisibles sugeridos en la Ley Federal de Derechos (LFD, 2019). La curva de valoración para T de la NSF fue utilizada sin ninguna modificación ya que la legislación mexicana para este parámetro utiliza un nivel de referencia que se selecciona por ser representativo de las condiciones naturales del cuerpo de agua y la NSF utiliza un criterio equivalente.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

### **3.5 Establecimiento de los pesos de los parámetros**

Establecer los pesos de los parámetros seleccionados permite proporcionar una medida de su importancia relativa de cada parámetro seleccionado para determinar el valor del índice final (Sutadian et al., 2016). Para asignar los pesos a los parámetros, se realizó un nuevo ACP que incluía los subíndices los parámetros seleccionados.

El procedimiento para seleccionar el conjunto de pesos idóneo (entre aquellos arrojados por el ACP) consistió en comparar los valores del ICA-RS calculados con cada uno de los conjuntos de pesos para identificar cuál de ellos reflejaba mejor las variaciones temporales y espaciales. Para dicho propósito, inicialmente se llevó a cabo un par de análisis de discriminantes lineal (ADL) para detectar cómo, en conjunto, los valores del ICA-RS calculados con los 10 vectores de pesos distinguen entre temporadas del año (análisis de discriminantes temporal) y entre puntos de muestreo (análisis de discriminantes espacial). Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), tanto temporal como espacial, a los conjuntos de valores de ICA-RS obtenidos al aplicar cada uno de los vectores de peso.

### **3.6 Agregación aditiva de indicadores**

Se utilizó el método aditivo más extendido es la media aritmética ponderada. Esto significa que las contribuciones de todos los indicadores pueden sumarse para obtener un valor total, lo que implica que existe sinergia y/o conflicto entre los diferentes indicadores.

### **3.7 Cálculo del ICA por estación**

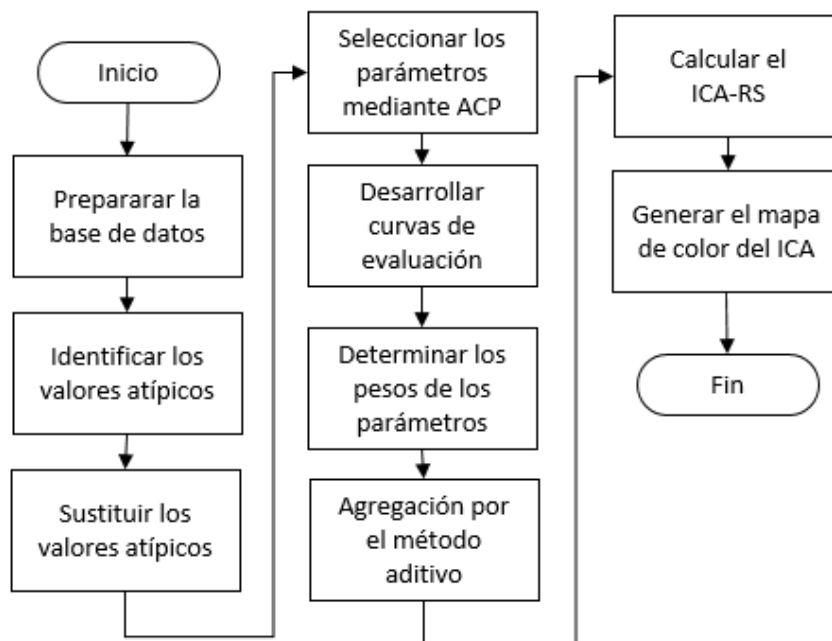
Las tendencias de calidad del agua del Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara se evaluaron utilizando el ICA específico para el ecosistema del río (ICA-RS). Se realizaron un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey para investigar la existencia de variaciones temporales y espaciales entre los valores del ICA-RS (Tukey, 1949). Se desarrollaron diagramas de caja para ilustrar estos resultados. Se desarrollaron gráficos de caja adicionales para comparar el comportamiento del ICA-RS con el comportamiento del índice de calidad del agua de la NSF (NSF-ICA) y con los indicadores de la CONAGUA.

### 3.8 Generación de mapas de color

Un mapa de color es un conjunto de valores que están asociados con colores. Los mapas de color se utilizan para mostrar el valor de una variable asociado de manera coherente con un código de colores. De esta forma cada valor calculado de una variable está asociado con un color (QGIS 3.5, 2019). El código de colores que se eligió en este trabajo es el mismo seleccionado para la escala de color de calificación de CONAGUA (SEMARNAT, 2019).

Los valores calculados del ICA-RS para cada estación de monitoreo de la calidad del agua de la CEA Jalisco se califican de acuerdo con el criterio de la NSF y se asocia al color correspondiente en el código. Con base en dichas categorías se realiza una interpolación de color en intervalos fijos resultando en un gradiente de color predeterminado en QGIS 3.5 (2019) únicamente considerando la distancia para mostrar la transición en la calidad entre los valores de los puntos de muestreo en los que difiere la calidad del agua.

El proceso general seguido en este trabajo se describe en la figura 2.



**Figura 2.** Diagrama del proceso seguido para el desarrollo del ICA.



## 4 RESULTADOS

### 4.1 Exploración inicial de datos

La base de datos de calidad de agua de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco corresponde a 13 estaciones de muestreo, de las cuales 2 se ubican sobre Arroyo El Ahogado, 10 sobre Río Santiago y uno sobre Río Zula (expresadas respectivamente por las siguientes siglas: AA-01, AA-02, RS-01 a RS-10 y RZ-01), para el periodo comprendido entre febrero 2009 a diciembre del 2019 (CEA Jalisco, 2020). La base de datos tiene hasta 1,342 observaciones para cada uno de los siguientes 44 parámetros. La matriz de datos contiene 1,342 filas y 44 columnas, resultando en 59,048 entradas, de las cuales sólo 3,014 son valores ausentes (5.1%). Los parámetros medidos fueron temperatura (TEMP), pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad (CON), turbidez (TUR), alcalinidad total (ALK), cloruros totales (CLO), dureza total (DT), fluoruros (FL), nitrógeno de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrógeno de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), nitrógeno de Kjeldahl (KJE), sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ ), sustancias activas al azul de metileno (SAAM), demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites (GYA), fósforo total (PT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos sedimentables (SD), sulfuros (SUL), aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), sodio (Na), zinc (Zn), coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), materia flotante (MF), temperatura ambiente (TEMPA), acidez total (ACID), dureza de calcio (DCA), sólidos totales (ST) y nitrógeno total (NT).

Los parámetros de materia flotante, acidez total y dureza de calcio fueron descartados para los análisis subsecuentes debido a tenían una proporción de 42.54%, 70.56% y 71.16% de observaciones ausentes, respectivamente.

De acuerdo con los criterios de clasificación de parámetros de calidad de agua presentados por Sutadian et al., (2018), los parámetros se agruparon como se muestra en la tabla 7.

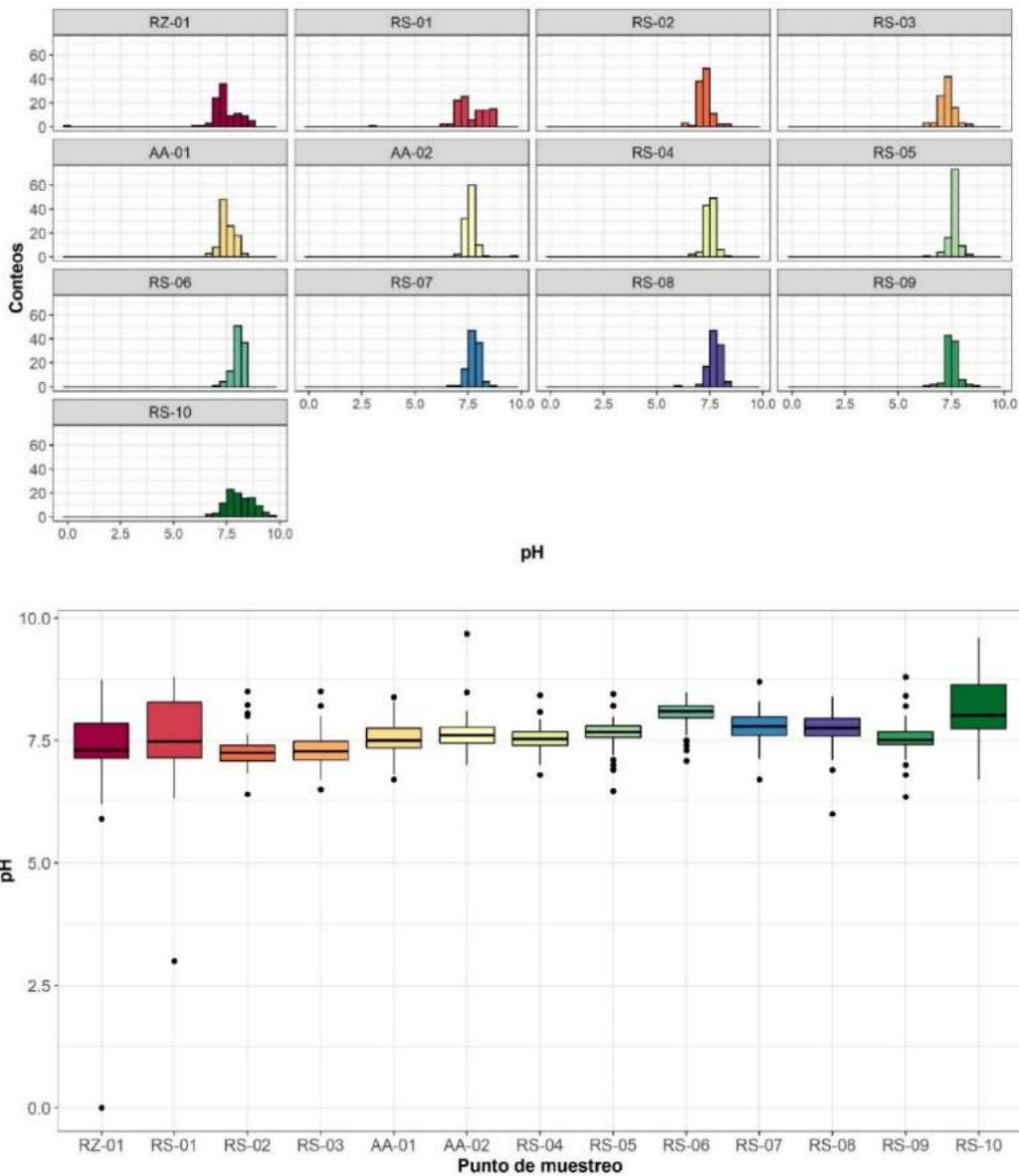
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 7.** Listado de los 44 parámetros iniciales en la base de datos de la CEA clasificados en los siete grupos propuestos por Sutadian et al., (2018).

Grupo	Parámetro
Físicos	Temperatura (TEMP), Conductividad (CON), Turbidez (TUR), Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos disueltos totales (SDT), Sólidos sedimentables (SS), Materia flotante (MF), Temperatura ambiente (TEMPA), Sólidos totales (ST), Potencial de hidrógeno (pH), Alcalinidad (ALK) y Acidez (ACID)
Agotamiento de oxígeno	Oxígeno disuelto (OD), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) y Demanda química de oxígeno (DQO)
Nutrientes	Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), Nitrógeno amoniacal (NH <sub>3</sub> -N), Nitrógeno de Kjeldahl (KJE), Fósforo total (PT) y Nitrógeno total (NT)
Orgánicos	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y Grasas y aceites (GYA)
Metales pesados	Aluminio (Al), Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn)
Iones y minerales	Cloruros totales (CT), Dureza total (DT), Fluoruros (FL), Dureza de calcio (DCA), Sulfuros (SUL), Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> ), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn) y Sodio (Na)
Micro-biológicos	Coliformes fecales (CF) y Coliformes totales (CT)

A manera de ejemplo se muestran las distribuciones para el pH, que se ajustan bien a una distribución normal en la mayoría de las estaciones, es decir, las observaciones se acumulan alrededor de la media. En los diagramas de caja se observan valores que están fuera de los extremos que fueron identificados como datos atípicos evidentes o potenciales (figura 3). Para la confirmación de estos datos como atípicos se hicieron otros análisis que se describen posteriormente.

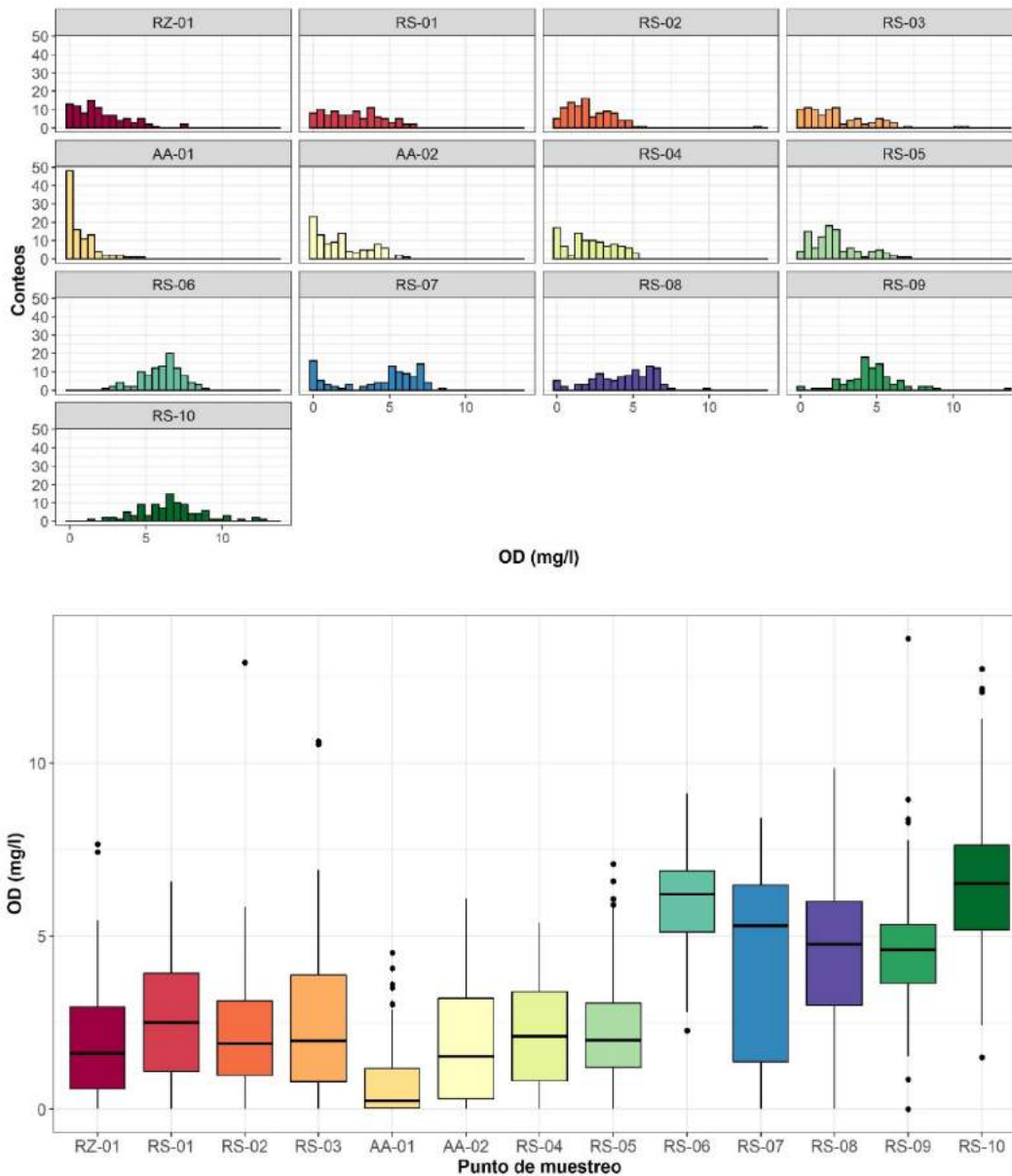
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 3.** Histogramas y diagramas de caja para el potencial de hidrógeno (pH).

En la figura 4 se muestran los gráficos correspondientes a oxígeno disuelto (OD), la distribución para esta variable es heterogénea entre las estaciones, pues existen algunas distribuciones donde se observa algún sesgo.

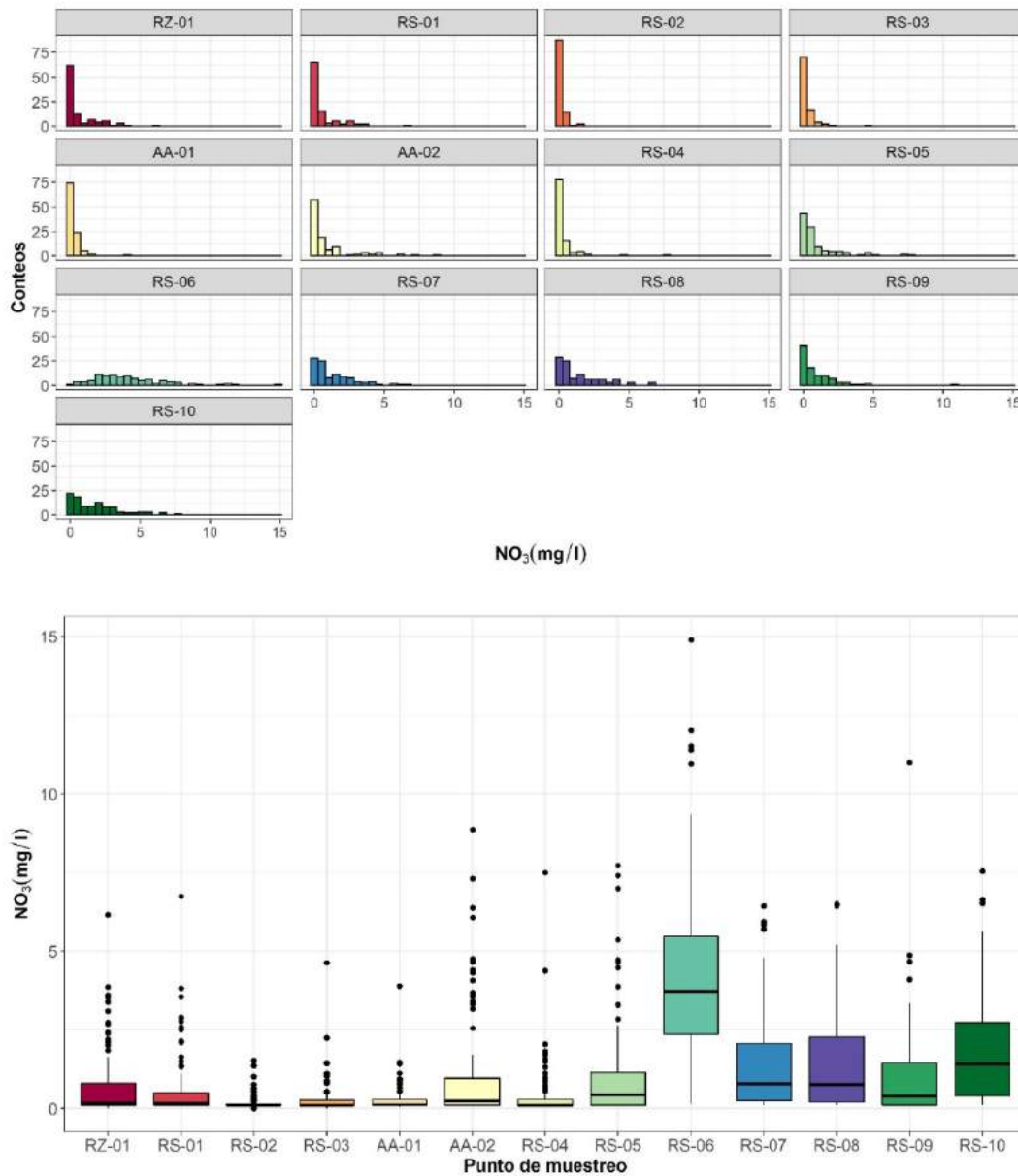
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 4.** Histogramas y diagramas de caja para el oxígeno disuelto (OD).

En el caso de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en la figura 5, los datos están sesgados a la derecha, una buena cantidad de observaciones son mayores al extremo superior, pero esto no implica necesariamente que sean valores atípicos. Por lo tanto, se hicieron análisis posteriores para la confirmación de los valores atípicos.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 5.** Histogramas y diagramas de caja para el nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

## 4.2 Eliminación de valores atípicos

La sucesión de pasos para la identificación, análisis y confirmación de datos atípicos se describen en las secciones siguientes.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

#### 4.2.1 Eliminación de datos atípicos evidentes

Como se mencionó en la sección anterior, los datos atípicos evidentes no pertenecen al rango de valores observables para los parámetros, tales datos se presentan por lo regular debido a errores de medición o de registro. Dado que los datos atípicos evidentes son fácilmente identificables, estos fueron eliminados inicialmente.

#### 4.2.2 Cálculo de mediana acoplada (MC) de cada parámetro de calidad de agua por cada punto de muestreo

Para cuantificar la asimetría y el sesgo de una muestra univariable  $\{x_1, \dots, x_n\}$  con una distribución continua unimodal  $\mathcal{D}$ , se utilizó la media acoplada (Brys et al., 2004) definida por:

$$MC = \underset{x_i \leq Q_2 \leq x_j}{med} h(x_i, x_j)$$

donde  $Q_2$  es la mediana muestral y para todo par de observaciones  $x_i \leq x_j$  la función kernel,  $h$ , es dada por:

$$h(x_i, x_j) = \frac{(x_j - Q_2) - (Q_2 - x_i)}{x_j - x_i}$$

Luego, la media acoplada es igual a la mediana de todas las imágenes  $h(x_i, x_j)$  para las cuales  $x_i \leq Q_2 \leq x_j$ . Como consecuencia  $-1 \leq MC \leq 1$ , es positiva para distribuciones que están sesgadas a la derecha, negativa para distribuciones sesgadas a la izquierda y cero para distribuciones simétricas (Hubert y Vandervieren, 2008).

Para cada parámetro y por cada punto de muestreo se calculó la mediana acoplada (medcouple, que se denota por MC) para determinar si la distribución de sus observaciones respectivas era sesgada.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

### 4.2.3 Análisis de las distribuciones sesgadas

Para aquellas variables y puntos de muestreo donde  $|MC| \geq 0.4$ , cuyas distribuciones fueron consideradas como sesgadas, se realizó un diagrama de cajas ajustado con la metodología planteada por Hubert y Vandervieren (2008). Tal diagrama de cajas modifica la extensión del intervalo permisible para la distribución, de la siguiente manera:

cuando  $MC \geq 0$

$$[Q_1 - 1.5e-4MC \text{ IQR}; Q_3 + 1.5e3 \text{ MC IQR}]$$

y para  $MC < 0$

$$[Q_1 - 1.5e-3MC \text{ IQR}; Q_3 + 1.5e4 \text{ MC IQR}]$$

donde  $Q_1$  y  $Q_3$  son los cuantiles 1 y 3 respectivamente e IQR es el rango intercuartil.

Las observaciones que no pertenecían al intervalo correspondiente ni al dado por el diagrama de cajas usual ( $[Q_1 - 1.5IQR; Q_3 + 1.5IQR]$ ), fueron considerados como datos atípicos y fueron removidos del conjunto de datos. Es decir, se determinaron como datos atípicos aquellas observaciones que excedían los límites tanto del diagrama de caja usual como del diagrama de cajas usual.

### 4.2.4 Análisis para distribuciones simétricas (o no sesgadas)

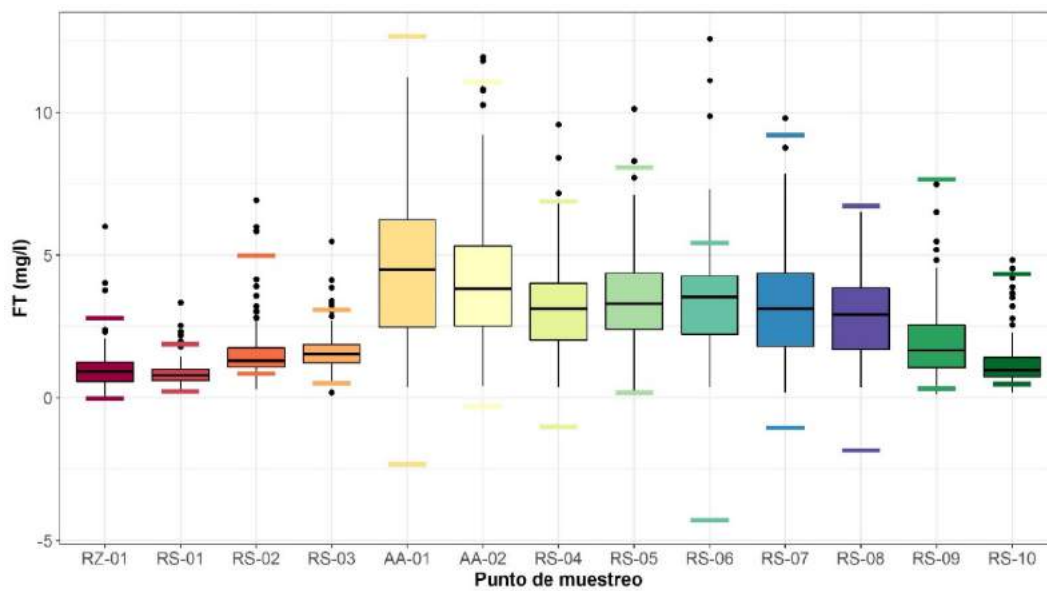
Para aquellas variables cuyas distribuciones resultaron simétricas o no sesgadas (i.e. aquellas para las cuales  $|MC| < 0.4$ ), se identifican las observaciones que no pertenecían al intervalo del diagrama de cajas usual y se les aplicó la prueba de Grubbs para valores atípicos (Grubbs, 1950), la cual es una prueba de hipótesis que se puede aplicar a una muestra univariable con distribución aproximadamente normal.

A manera de ejemplo, en la tabla 8 se muestra el resumen estadístico del parámetro fósforo total (PT) y en la figura 6 los respectivos diagramas de caja por estación, donde las líneas horizontales indican los límites inferior y superior para el diagrama de cajas ajustado considerando la MC. De acuerdo con los valores de MC obtenidos, se puede concluir que la variable se distribuye de manera normal, considerando los datos de todas las estaciones.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 8.** Resumen estadístico para el parámetro fósforo total (PT), incluyendo la media acoplada (MC).

EST	Media	sd	Mín	Q1	Mediana	Q2	Máx	IQR	MC
RZ-01	1.08	0.81	0.00	0.56	0.93	1.25	6.00	0.69	0.14
RS-01	0.91	0.51	0.19	0.60	0.79	1.01	3.33	0.41	0.12
RS-02	1.62	1.06	0.30	1.07	1.30	1.75	6.92	0.68	0.38
RS-03	1.69	0.79	0.19	1.23	1.54	1.87	5.48	0.65	0.07
AA-01	4.68	2.59	0.37	2.47	4.50	6.24	11.23	3.78	0.04
AA-02	4.28	2.52	0.40	2.51	3.83	5.32	11.93	2.82	0.10
RS-04	3.31	1.69	0.37	2.03	3.12	4.01	9.58	1.98	-0.01
RS-05	3.46	1.67	0.22	2.39	3.30	4.37	10.12	1.98	0.07
RS-06	3.54	1.98	0.37	2.22	3.55	4.28	12.58	2.06	-0.25
RS-07	3.36	1.89	0.18	1.80	3.13	4.37	9.80	2.57	0.08
RS-08	2.96	1.44	0.36	1.70	2.93	3.85	6.50	2.16	-0.03
RS-09	2.03	1.37	0.12	1.06	1.66	2.55	7.48	1.49	0.28
RS-10	1.29	0.96	0.19	0.73	0.98	1.41	4.83	0.68	0.35



**Figura 6.** Diagramas de caja para el fósforo total (PT).



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

#### 4.2.5 Estimación de valores ausentes

Para estimar los valores ausentes (ya sea porque inicialmente no fueron registrados por la CEA o bien, porque fueron considerados como datos atípicos y fueron eliminados) se utilizó el método de *multiple imputation* (MI) (Rubin y Little, 2002), el cual considera la distribución de los datos observados para estimar múltiples valores para las observaciones ausentes. Los pasos planteados por Rubin y Little (2002) para la sustitución de valores ausentes son: (1) ajustar los datos a un modelo apropiado, (2) estimar cada dato ausente considerando valores cercanos y, (3) repetir los pasos 1 y 2 para cada dato ausente, generando un conjunto de posibles valores para la sustitución. Finalmente, (4) realizar un análisis de los conjuntos generados para seleccionar aquel que se ajuste mejor a todo el conjunto de datos. Uno de los modelos más utilizados para realizar el paso 1 es el de *conditional multiple imputation* (CMI), que considera un procedimiento iterativo, modelando la distribución de cierta variable respecto al complemento.

Para el conjunto completo de datos, 1,267 observaciones ausentes fueron obtenidas de un total de 55,022 (el 2.3%). A manera de ejemplo, en las figuras 7 y 8 se muestran las series de tiempo para sulfuros en el punto de muestreo RS-06 y sólidos suspendidos totales en RZ-01, cabe señalar que el método para sustituir los valores ausentes considera la tendencia de la variable (tanto los valores inmediatos previos como los subsecuentes) para las estimaciones.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

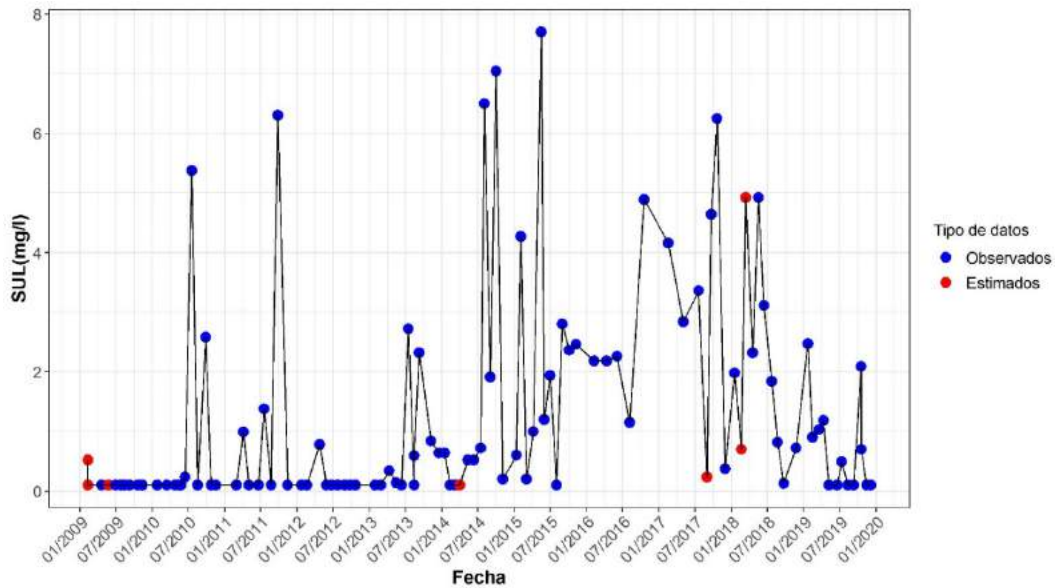


Figura 7. Sustitución de valores ausentes de sulfuros.

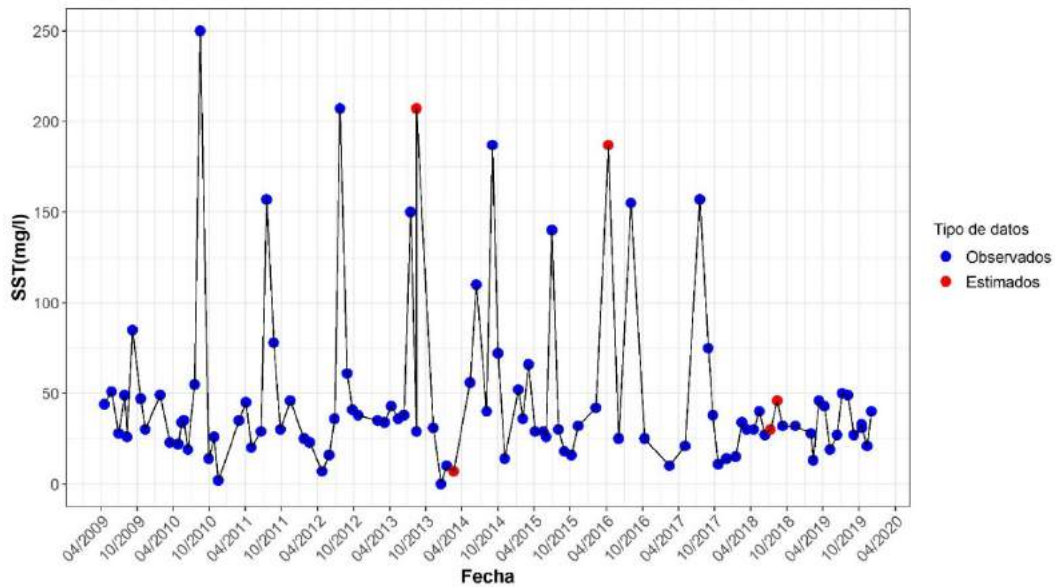


Figura 8. Sustitución de valores ausentes de SST.

### 4.3 Selección de los parámetros del índice de calidad de agua

Una vez que se removieron los valores atípicos y se reemplazaron todos los valores ausentes, se seleccionaron aquellos parámetros que afectan significativamente la calidad del agua, que son representativos de los procesos de contaminación del cuerpo de agua tanto naturales como antropogénicos y que reflejaban satisfactoriamente las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua (Gradilla-Hernández et al., 2020).

El método de Análisis de Componentes Principales (ACP) permite identificar aquellos parámetros que explican de mejor manera la variación del conjunto de datos, reduciendo la dimensión de variables para poder desarrollar un índice de calidad del agua que refleje una proporción aceptable de la variación total (Everitt y Hothorn, 2011). El ACP se llevó a cabo para cada uno de los grupos de parámetros de calidad de agua de acuerdo con los criterios de clasificación presentados por Sutadian et al. (2018): Físicos, Agotamiento de oxígeno, Nutrientes, Orgánicos, Metales pesados, Iones y minerales y Microbiológicos. Los parámetros correspondientes a cada clasificación se muestran en la (tabla 5).

A manera de ejemplo se describe el procedimiento desarrollado para el subconjunto de parámetros físicos (TEMP, CON, TUR, SST, SDT, SS, TEMPA, ST, pH Y ALK). El objetivo fundamental del ACP es describir la variación en un conjunto de variables correlacionadas (en este caso los 10 parámetros físicos) en términos de un nuevo conjunto de variables no correlacionadas  $y = (y_1, \dots, y_{10})$ , donde cada  $y_j$  es una combinación lineal de las variables. Las nuevas variables  $y_1, \dots, y_{10}$  son llamadas las componentes principales. La primera componente principal de las observaciones es aquella combinación lineal de las variables originales cuya varianza muestral es la mayor de entre todas las posibles combinaciones lineales posibles. La segunda componente principal está definida como la combinación lineal de las variables originales que brindan la máxima proporción de la varianza restante sujeta a no tener correlación con la primera componente principal. Las componentes sucesivas están definidas de manera análoga (Everitt y Hothorn, 2011).

La  $i$ -ésima componente principal,  $y_i$ , es la combinación lineal:

$$y_i = a_{i1}TEMP + a_{i2}CON + a_{i3}TUR + a_{i4}SST + a_{i5}SDT + a_{i6}SS + a_{i7}TEMPA + a_{i8}ST + a_{i9}pH + a_{i10}ALK$$

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

donde  $a_i = (a_{i1}, \dots, a_{i10})$  es el vector de coeficientes que brinda la mayor varianza muestral sujeto a las condiciones:

$$\langle a_i, a_i \rangle = 1$$

$$\langle a_i, a_j \rangle = 0, i \neq j$$

El vector de coeficientes que define la  $i$ -ésima componente principal  $a_i$  es el eigenvector de  $R$  (la matriz de correlación muestral de los parámetros) asociado al  $i$ -ésimo eigenvalor mayor. Donde la matriz de correlación  $R$  es aquella cuyos elementos son los coeficientes de correlación  $\rho_{ij}$  definidos por:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$$

Donde  $\sigma_{ij}$  es la covarianza de las variables  $i$  y  $j$ ,  $\sigma_i$  es la desviación estándar de la  $i$ -ésima variable.

Si los 10 eigenvalores de  $R$  son denotados por  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_{10}$  y se requiere que  $\langle a_i, a_i \rangle = 1$ , la varianza de la  $i$ -ésima componente principal está dada por  $\lambda_i$ . La varianza total de las 10 componentes principales es igual a la varianza total de las variables originales. Luego, la  $i$ -ésima componente principal contribuye con una proporción  $P_i$  de la variación total del conjunto original de las variables,

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\text{traza}(R)}$$

Nótese que en este caso la traza ( $R$ ) es igual a 10 (el número de variables). La varianza acumulada de las  $m$  primeras componentes principales es la suma de las respectivas  $m$  proporciones  $P_i$ .

En la tabla 9 se muestran los respectivos eigenvalores para el subconjunto de los parámetros físicos, la proporción de la varianza explicada por cada componente y la

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

varianza acumulada. Cabe señalar que tan sólo con las dos primeras componentes se explica el 57% de la varianza.

**Tabla 9.** Eigenvalores, % varianza explicada por componente y varianza acumulada por componentes.

Componente	Eigenvalor	% varianza	% varianza acumulada
PC1	3.59	35.89	35.89
PC2	2.11	21.13	57.02
PC3	1.72	17.15	74.17
PC4	0.86	8.56	82.74
PC5	0.67	6.72	89.46
PC6	0.33	3.33	92.79
PC7	0.25	2.50	95.30
PC8	0.24	2.39	97.69
PC9	0.15	1.46	99.15
PC10	0.09	0.85	100.00

El biplot extiende la idea de un diagrama de dispersión simple de dos variables al caso de muchas variables, con el objetivo de visualizar la mayor cantidad posible de información en los datos. La longitud del vector correspondiente a alguno de los parámetros refleja la varianza de tal variable. La correlación de dos variables es reflejada por el ángulo entre los correspondientes vectores, donde ángulos menores muestran correlación positiva y explican de manera análoga la variabilidad. Ángulos colineales indican correlación negativa y vectores ortogonales reflejan correlación nula (Jolliffe, 2002).

En la figura 9 se muestran los biplots de cada uno de los grupos de parámetros de calidad de agua, en los cuales se grafican los vectores proyectados sobre el subespacio generado por las dos primeras componentes principales (excepto en metales pesados donde también se considera el biplot de las componentes 1 y 3), que son aquellas que aportan mayor variabilidad para cada uno de los subconjuntos de datos. En la tabla 10 se muestran las

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

varianzas acumuladas para el primer par de componentes correspondientes a cada grupo de parámetros de calidad de agua.

**Tabla 10.** Varianza acumulada por grupo.

<b>Grupo</b>	<b>% varianza acumulada</b>
Físicos	57.02
Agotamiento de oxígeno	95.86
Nutrientes	78.14
Orgánicos	100.00
Metales pesados*	44.41
Iones y minerales	66.37
Microbiológicos	100.00

\*En el caso de metales pesados se consideraron las tres primeras componentes principales.

En el biplot correspondiente a los parámetros físicos se aprecia que ALK, CON, ST y SDT están agrupados en el tercer cuadrante y con una contribución similar, siendo SDT el que aporta más, y que por lo tanto fue seleccionado para incluirse en el RS-ICA. Por otro lado, TEMP y TEMPA tienen una alta correlación siendo de principal interés la temperatura del agua, por lo que fue seleccionada para incluirse en el RS-ICA. Adicionalmente, SS, TUR y SST tienen una alta correlación entre sí, y SST es el vector de mayor longitud, por lo que es seleccionado para incluirse en el RS-ICA. Finalmente, pH es seleccionado por tener una correlación nula con el último subconjunto de parámetros mencionados.

Dado que los grupos de parámetros orgánicos y microbiológicos constan sólo de dos parámetros, de cada uno se seleccionó aquel que tenía un mayor coeficiente de variación, GYA y CF, respectivamente.

Adicionalmente, se determinó el porcentaje de las observaciones que exceden los valores permisibles reportados en la Ley Federal de Derechos para la protección de la vida

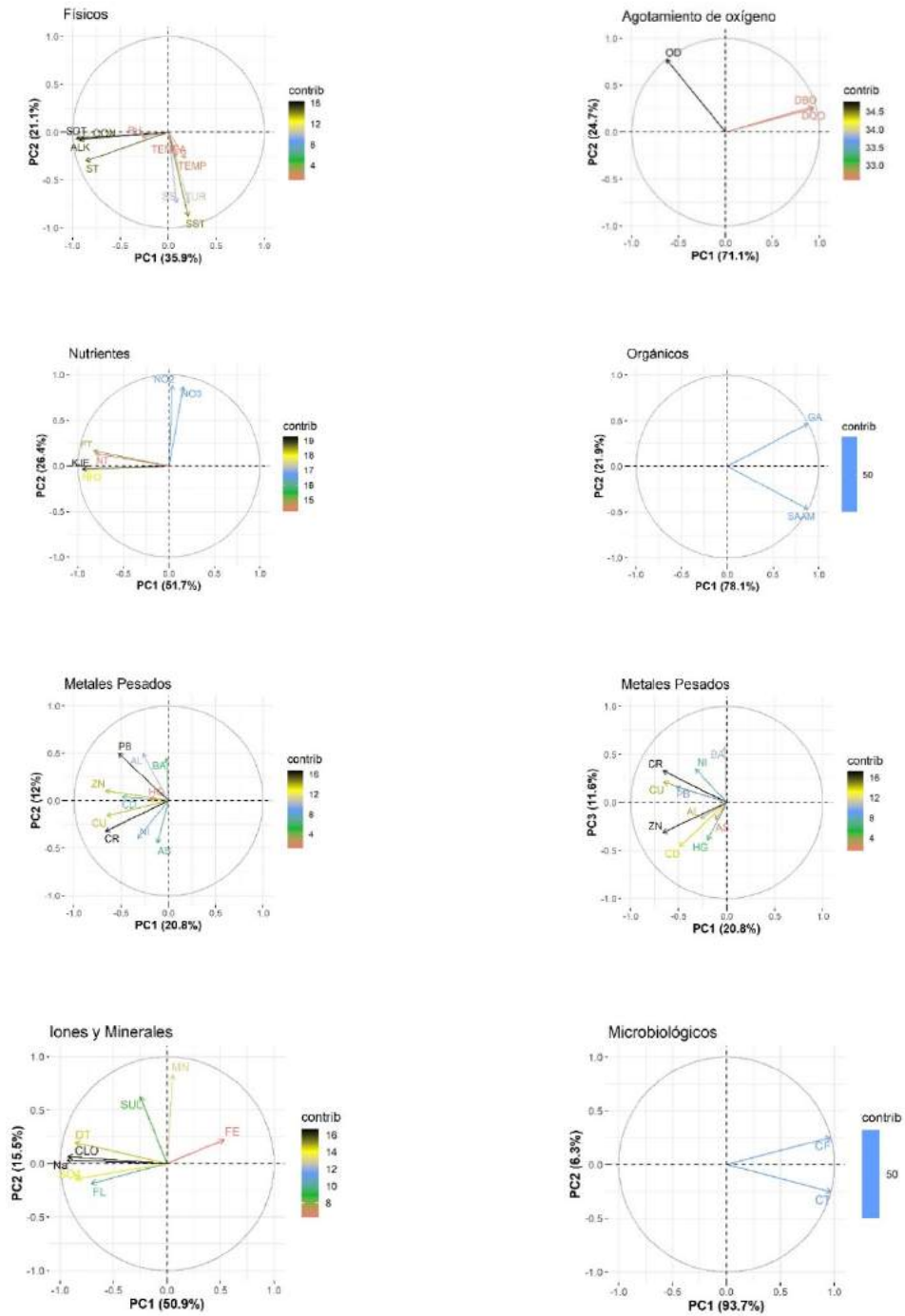
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

acuática mostrados en la tabla 11 (LFD, 2019). Entre los parámetros seleccionados mediante el ACP se dio prioridad a aquellos que excedían recurrentemente los valores permisibles.

**Tabla 11.** Resumen de valores permisibles en la Ley Federal de Derechos para la protección a la vida acuática y el porcentaje de las observaciones que lo exceden (LFD, 2019).

Parámetro	Valor permisible en la LFD	Porcentaje de observaciones mayores al valor permisible
DBO <sub>5</sub>	30 (mg/l)	23
OD	58.45 (%)	27
pH	6.5 – 8.5 (UpH)	4
CF	1000 (NMP/100 ml)	87
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04 (mg/l)	100
SDT	500 (mg/l)	63
SST	30 (mg/l)	44
NH <sub>3</sub> -N	0.06 (mg/l)	100
GYA	10 (mg/l)	21
Pb	0.03 (mg/l)	0
Zn	0.02 (mg/l)	72
Cr	0.05 (mg/l)	2
Cd	0.004 (mg/l)	6
FL	1 (mg/l)	46
SUL	0.02 (mg/l)	100
Hg	0.0005 (mg/l)	46

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 9.** Biplots por grupos de parámetros de calidad del agua.



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Los parámetros seleccionados y el proceso de selección se resumen en la tabla 12.

**Tabla 12.** Parámetros seleccionados y proceso de selección.

Criterio de selección de parámetros					
Grupo	Parámetros (en mg/l excepto cuando se especifique)	Cribado inicial	ACP	Cantidad de datos superiores a límite máximo	Parámetros seleccionados
Físicos	Temperatura (°C)	✓	✓	X	✓
	Conductividad (µS/cm)	✓	X	X	X
	Turbidez (UTN)	✓	X	X	X
	Sólidos suspendidos totales	✓	✓	X	✓
	Sólidos disueltos totales	✓	✓	X	✓
	Sólidos sedimentables (ml/l)	✓	X	X	X
	Materia flotante (l/O)	X	X	X	X
	Temperatura ambiente (°C)	✓	X	X	X
	Sólidos totales	✓	X	X	X
	Potencial de hidrógeno (UpH)	✓	✓	X	✓
	Alcalinidad	✓	X	X	X
	Acidez	X	X	X	X
Agotamiento de oxígeno	Oxígeno disuelto	✓	✓	X	✓
	Demanda bioquímica de oxígeno	✓	✓	X	✓
	Demanda química de oxígeno	✓	X	X	X
Nutrientes	Nitritos	✓	X	X	X
	Nitratos	✓	✓	X	✓
	Nitrógeno amoniacal	✓	✓	X	✓
	Nitrógeno de Kjeldahl	✓	X	X	X
	Fósforo total	✓	X	X	X
	Nitrógeno total	✓	X	X	X

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Orgánicos	Sustancias activas al azul de metileno	✓	X	X	X
	Grasas y aceites	✓	✓	X	✓
Metales pesados	Aluminio	✓	X	X	X
	Arsénico	✓	X	X	X
	Bario	✓	X	X	X
	Cadmio	✓	X	X	✓
	Cobre	✓	X	X	X
	Cromo	✓	✓	X	✓
	Mercurio	✓	X	✓	✓
	Níquel	✓	X	X	X
	Plomo	✓	✓	X	✓
	Zinc	✓	✓	X	✓
Iones y minerales	Cloruros totales	✓	X	X	X
	Dureza total	✓	X	X	X
	Fluoruros	✓	✓	X	✓
	Dureza de calcio	X	X	X	X
	Sulfuros	✓	✓	X	✓
	Sulfatos	✓	X	X	X
	Hierro	✓	X	X	X
	Manganeso	✓	X	X	X
	Sodio	✓	X	X	X
Microbiológicos	Coliformes fecales (NMP/100ml)	✓	✓	X	✓
	Coliformes totales (NMP/100ml)	✓	X	X	X
<b>Resumen</b>	<b>44</b>	<b>41</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>17</b>

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

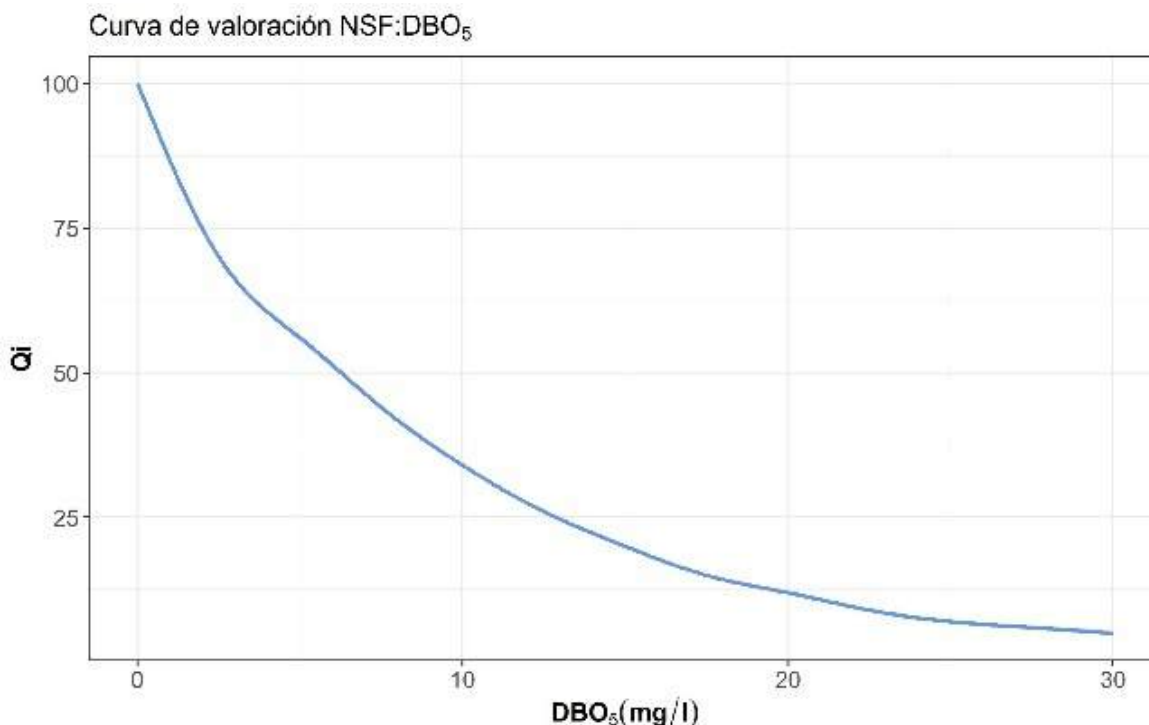
**Tabla 13.** Resumen estadístico de los valores de los parámetros seleccionados.

Parámetro	Media	sd	IQR	Mín.	Q25	Mediana	Q75	Máx
DBO <sub>5</sub>	27.625	45.803	22.665	0.000	5.340	11.505	28.005	425.000
OD	3.244	2.422	3.950	0.000	1.190	2.950	5.140	11.280
DOP	38.232	29.193	46.958	0.000	13.366	34.072	60.324	136.053
PH	7.638	0.431	0.518	6.200	7.350	7.600	7.868	9.600
TEMP	23.164	3.517	4.500	11.000	21.000	23.300	25.500	33.000
DTEMP	4.118	3.174	4.400	-7.800	2.000	4.256	6.400	13.409
CF	2231942	8037102	1090700	0.000	9300	110000	1100000	1.1E+08
NO <sub>3</sub>	1.092	1.677	1.380	0.000	0.100	0.270	1.480	12.040
SDT	598.872	231.987	384.500	0.000	392.250	603.500	776.750	1377.000
SST	51.778	77.584	48.000	0.000	9.000	25.000	57.000	728.000
NH <sub>3</sub>	7.151	8.500	9.095	0.000	1.230	3.510	10.325	54.690
GA	9.676	5.244	0.440	2.120	8.370	8.370	8.810	47.930
PB	0.004	0.004	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.034
ZN	0.067	0.064	0.064	0.000	0.020	0.042	0.084	0.450
CR	0.051	0.007	0.000	0.000	0.050	0.050	0.050	0.170
CD	0.0014	0.0037	0.0001	0.0000	0.0005	0.0005	0.0006	0.0408
FL	1.044	0.494	0.650	0.000	0.690	0.970	1.340	3.970
SUL	4.019	5.992	4.603	0.000	0.470	1.790	5.073	49.000
HG	0.0007	0.0004	0.0003	0.0005	0.0005	0.0005	0.0008	0.0032

#### 4.4 Desarrollo de las curvas de valoración

Para el desarrollo de las curvas de valoración de 14 (14/17) de los parámetros seleccionados (DBO<sub>5</sub>, CF, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SDT, SST, NH<sub>3</sub>-N, GYA, Pb, Zn, Cr, Cd, F, SUL y Hg) se utilizó el método de Hallock (2002) con una modificación aquí propuesta para incorporar los límites máximos permisibles presentados en la Ley Federal de Derechos considerando los criterios para la protección a la vida acuática. Los 14 parámetros señalados tienen la particularidad de que son parámetros cuya concentración en aumento afecta la calidad del agua, es decir, conforme las concentraciones aumentan la calidad del agua disminuye. Como ejemplo, se presenta la curva presentada por la NSF para DBO<sub>5</sub> (figura 10) en la cual se puede observar que a medida que aumenta la concentración de DBO<sub>5</sub> los subíndices obtenidos con la curva de valoración disminuyen exponencialmente (Rai et al., 2012).

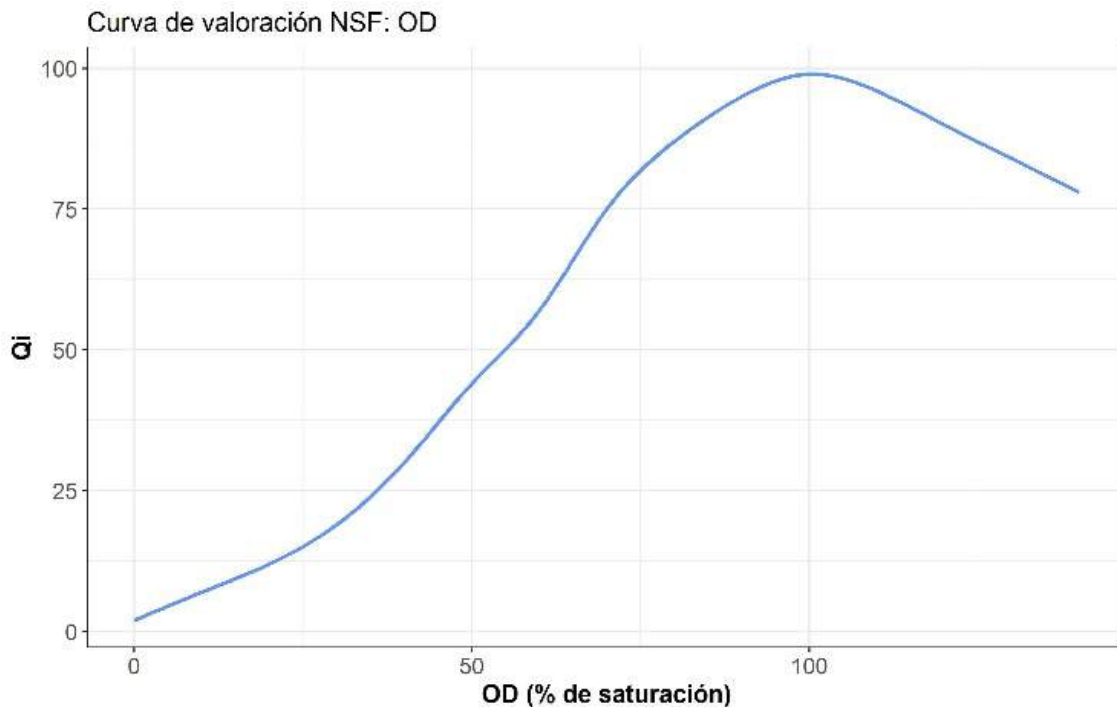
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 10.** Curva de valoración presentada por la NSF para DBO<sub>5</sub>.

En el caso de los tres parámetros restantes (OD, pH, y T), la relación con la calidad de agua no es tan simple. Estos parámetros muestran un punto máximo en la evaluación de la calidad del agua, a diferencia de una función decreciente en todo el rango de concentraciones. En el caso del OD (figura 11), por ejemplo, la máxima calidad de agua se relaciona con el 100% de saturación, y disminuye tanto para porcentajes de saturación menores como para mayores (Rai et al., 2012). Valores de saturación de OD elevados pueden ser indicativos de la presencia de altas concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales, que intensifican la actividad de algas y bacterias que contribuyen a el agotamiento de oxígeno de sus alrededores por la noche (Gradilla-Hernández et al., 2020). Por lo tanto, las curvas de valoración deben asignar valores más bajos a medida que aumenta el % de saturación de OD.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



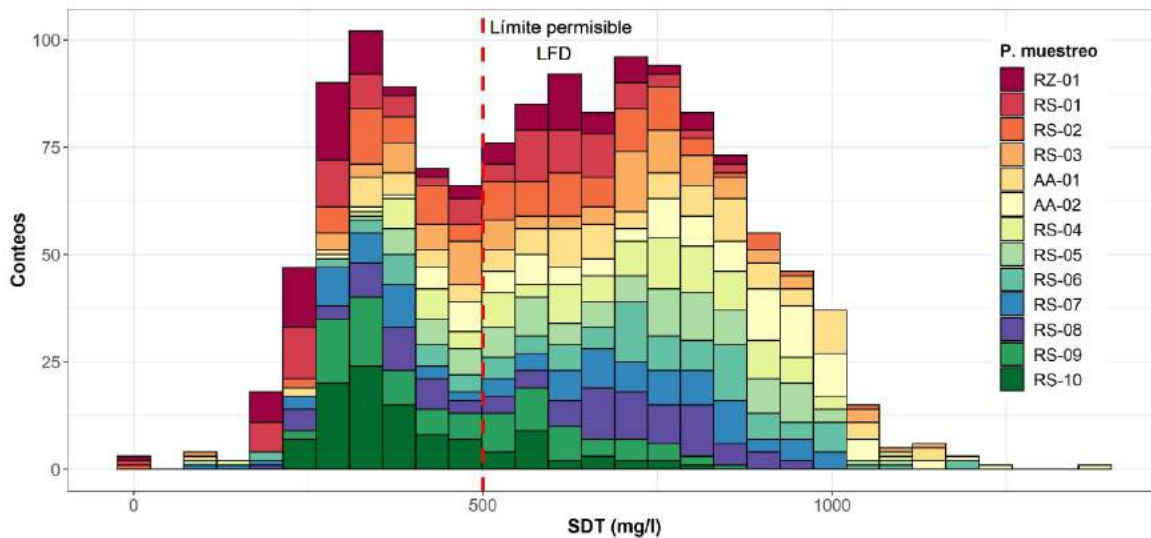
**Figura 11.** Curva de valoración presentada por la NSF para OD.

#### 4.4.1 Curvas de valoración desarrolladas por una modificación del procedimiento propuesto por Hallock

La metodología para obtener las curvas de valoración de la mayoría de los parámetros ( $\text{DBO}_5$ , CF,  $\text{NO}_3^-$ , SDT, SST,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , GYA, Pb, Zn, Cr, Cd, F, SUL y Hg) es una modificación propuesta del procedimiento planteado por Hallock (2002). Como se señaló anteriormente, para los parámetros de este subconjunto, entre mayores son las concentraciones decrece el subíndice de calidad asignado. A continuación, se describe el método adoptado.

Para desarrollar las curvas de estos 14 parámetros, inicialmente se identificó la distribución de las observaciones y se comparó con el límite permisible reportado en la Ley Federal de Derechos para la protección de la vida acuática (denotado  $V_{perm}$ ) para determinar el número de observaciones que excedían ese límite. A manera de ejemplo se muestra la distribución para el parámetro SDT con el límite permisible de 500 mg/l (figura 12) (LFD, 2019).

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 12.** Distribución del parámetro SDT por punto de muestreo y el valor permisible por la LFD 2019.

Posteriormente, se dividió el conjunto de datos en dos subconjuntos, aquellos que son menores o iguales que el valor permisible y aquellos que son mayores. Al límite permisible se le asignó un  $Q_i$  (denotado por  $Q_{i_{perm}}$ ) que depende del porcentaje de las observaciones que exceden el valor permisible. Para cada parámetro el respectivo  $Q_{i_{perm}}$  está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{i_{perm}} = -45P_e + 50$$

donde  $0 \leq P_e \leq 1$  es la proporción de observaciones que exceden el valor permisible de tal parámetro. De esta manera  $5 \leq Q_{i_{perm}} \leq 50$ . Este subíndice toma el valor mínimo ( $Q_{i_{perm}}=5$ ) cuando todas las observaciones exceden el valor permisible y toma el valor máximo ( $Q_{i_{perm}}=50$ ) cuando todas las observaciones son menores que el valor permisible. Este método fue propuesto para hacer más sensible al ICA-RS a concentraciones de parámetros que consistentemente exceden los valores estipulados en la normativa. En la tabla 14 se muestran los límites permisibles, la proporción de observaciones que exceden tal valor y el subíndice de valoración correspondiente al límite permisible para cada parámetro.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 14.** Resumen de valores permisibles y las observaciones que los exceden.

Parámetro	$V_{perm}$	Proporción mayor a $V_{perm}$	$Q_{i_{perm}}$
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	30	0.23	39.64
OD (%)	58.45	0.27	37.63
pH (UpH)	6.5	0.04	48.22
CF (NMP/100 ml)	1000	0.87	10.70
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.04	1.00	5.10
SDT (mg/l)	500	0.63	21.56
SST (mg/l)	30	0.44	30.35
NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	0.06	1.00	5.07
GYA (mg/l)	10	0.21	40.64
Pb (µg/l)	0.03	0.00	49.93
Zn (µg/l)	0.02	0.72	17.61
Cr (µg/l)	0.05	0.02	49.16
Cd (µg/l)	0.004	0.06	47.28
FL (mg/l)	1	0.46	29.38
SUL (mg/l)	0.02	1.00	5.13
Hg (µg/l)	0.0005	0.46	29.11

Adicionalmente, para el desarrollo de las curvas, se calcularon los cuantiles 0, 0.1, 0.8, 0.95, 0.99, y 1 para el subconjunto de observaciones menores a  $V_{perm}$ , es decir, el valor máximo para este subconjunto fue  $V_{perm}$ , y se les asignaron los siguientes  $Q_i$ 's:

$$\begin{aligned}
 Q_i(0) &= 100, & Q_i(0.1) &= 100 - 0.1Q_{i_{perm}}, & Q_i(0.8) &= 100 - 0.2Q_{i_{perm}} \\
 Q_i(0.95) &= 100 - 0.6Q_{i_{perm}}, & Q_i(0.99) &= 100 - 0.8Q_{i_{perm}}, & Q_i(1) &= Q_{i_{perm}}
 \end{aligned}$$

donde  $Q_i(q)$  es el subíndice correspondiente al valor del cuantil  $q$ .

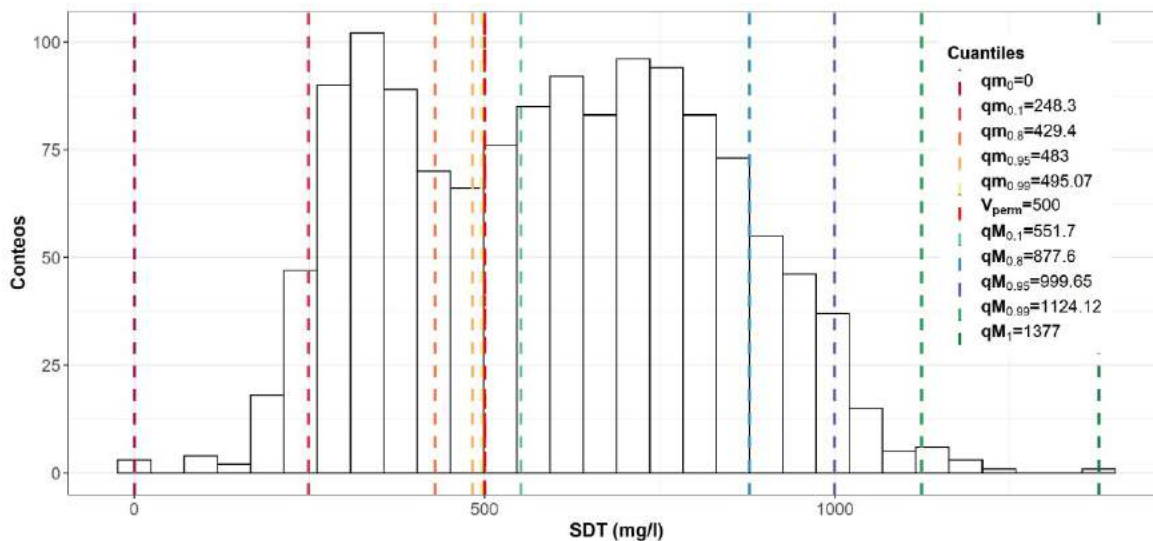
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

De manera análoga para las observaciones mayores al valor permisible se calcularon los cuantiles: 0, 0.1, 0.8, 0.95, 0.99, y 1, es decir, el valor mínimo de este subconjunto fue igual a  $V_{perm}$ , y se les asignaron los  $Q_i$ 's:

$$Q_i(0) = Q_{iperm}, \quad Q_i(0.1) = Q_{iperm} - 0.1Q_{iperm}, \quad Q_i(0.8) = Q_{iperm} - 0.2Q_{iperm}$$

$$Q_i(0.95) = Q_{iperm} - 0.6Q_{iperm}, \quad Q_i(0.99) = Q_{iperm} - 0.8Q_{iperm}, \quad Q_i(1) = 0$$

donde  $Q_i(q)$  es el subíndice asignado al valor del cuantil  $q$ . A manera de ejemplo, la figura 13 muestra la distribución del parámetro SDT, los cuantiles mencionados y el límite máximo permisible. Dichos elementos fueron la base para el desarrollo de la curva de valoración.

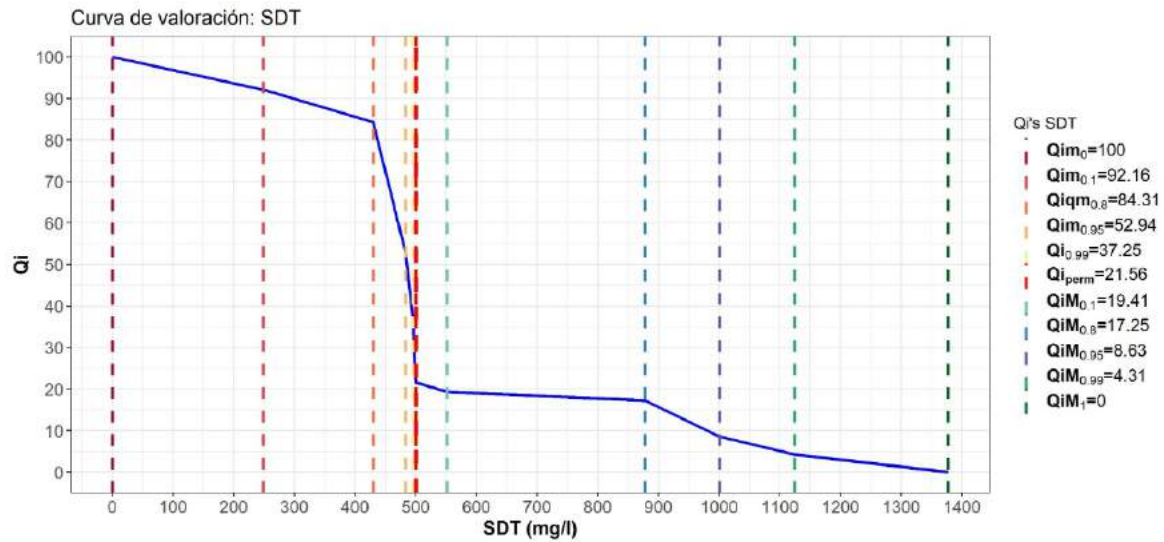


**Figura 13.** Distribución del parámetro SDT los cuantiles mencionados y el valor permisible.

Los valores entre los cuantiles se evaluaron por medio de interpolaciones lineales tanto para los valores mayores a  $V_{perm}$  como para los menores. Por ejemplo, para el parámetro de sólidos disueltos totales, el valor permisible ( $V_{perm} = 500$  mg/l) fue excedido por el 63% de observaciones. En la figura 14 se muestra la distribución de este parámetro por cuantiles y la línea en rojo indica el nivel permisible y en azul se muestran las rectas de valoración correspondientes (que conforman en conjunto la curva de valoración).



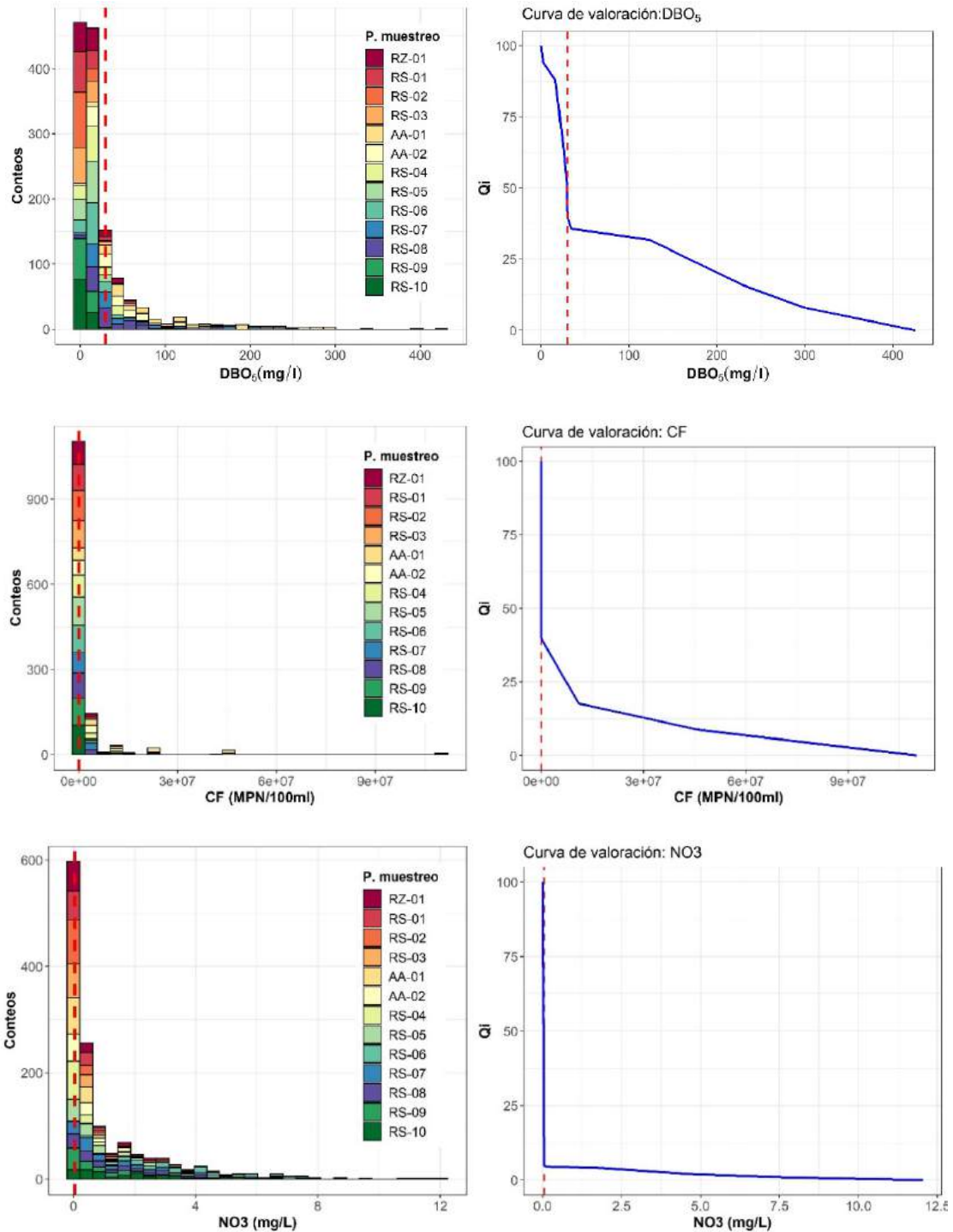
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 14.** Curva de valoración desarrollada para SDT.

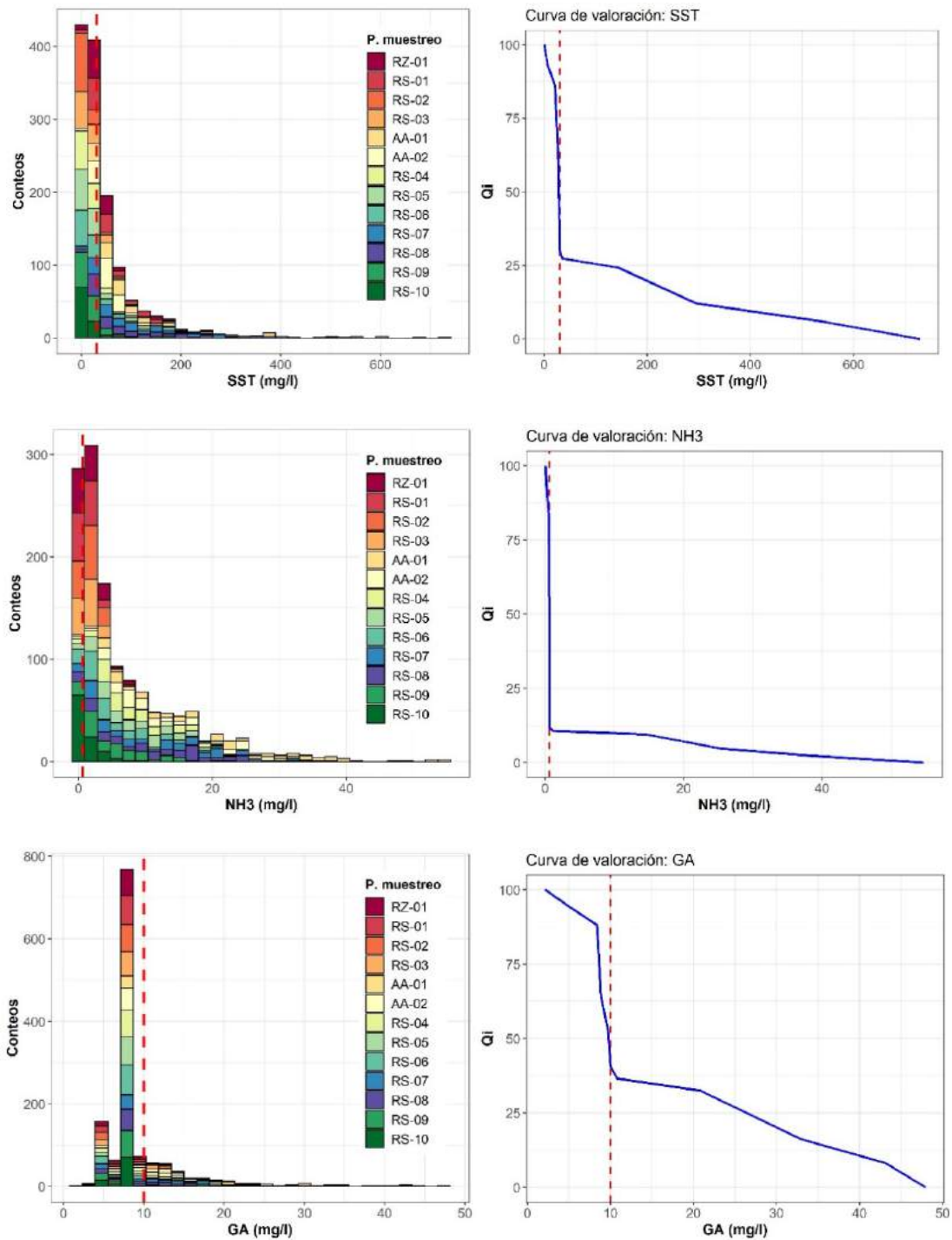
El resto de las curvas desarrolladas por el método de Hallock (2002) modificado se presentan en las figuras 15, 16, 17, 18 y 19.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



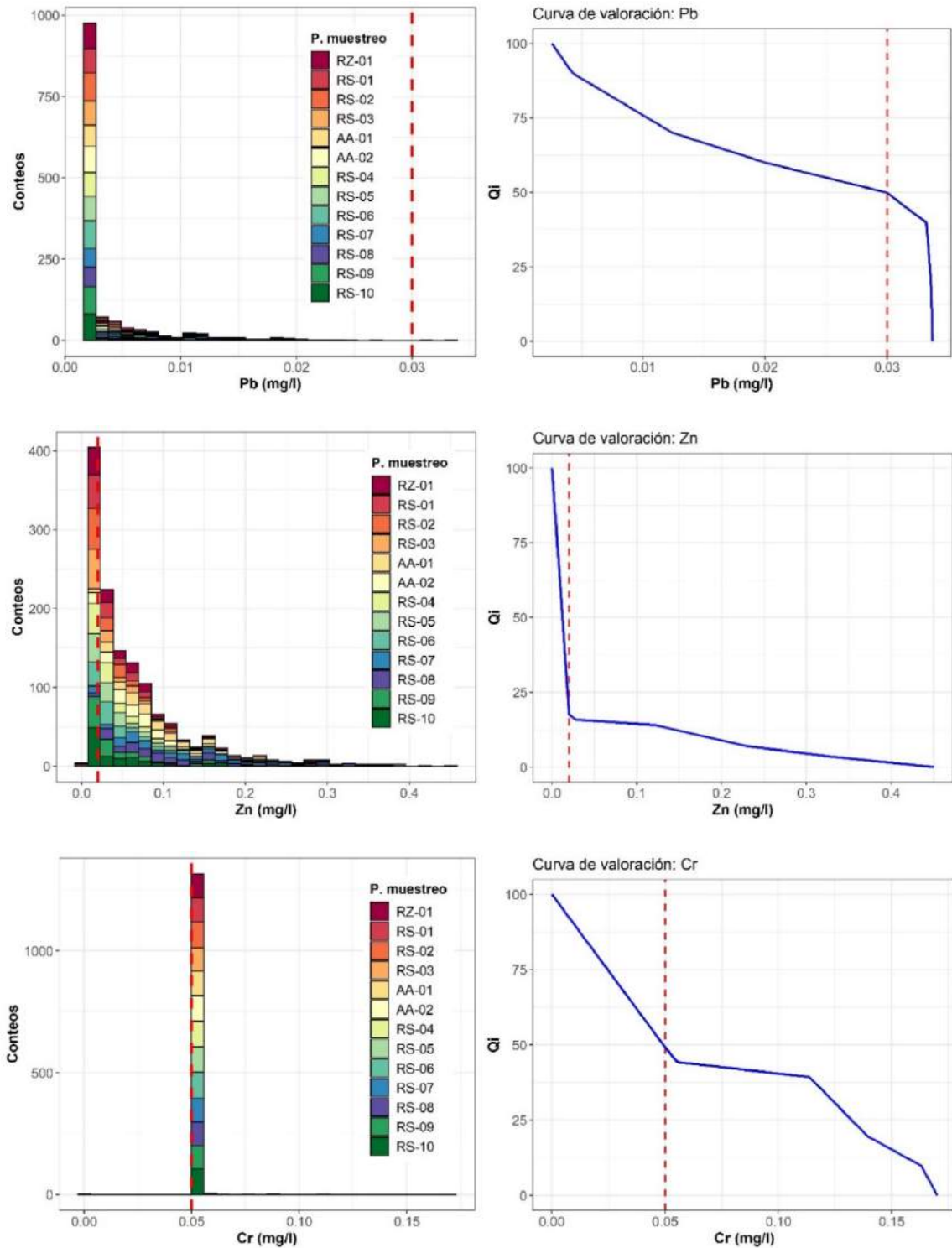
**Figura 15.** Curvas de valoración desarrollada para DBO<sub>5</sub>, CF y NO<sub>3</sub>:

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



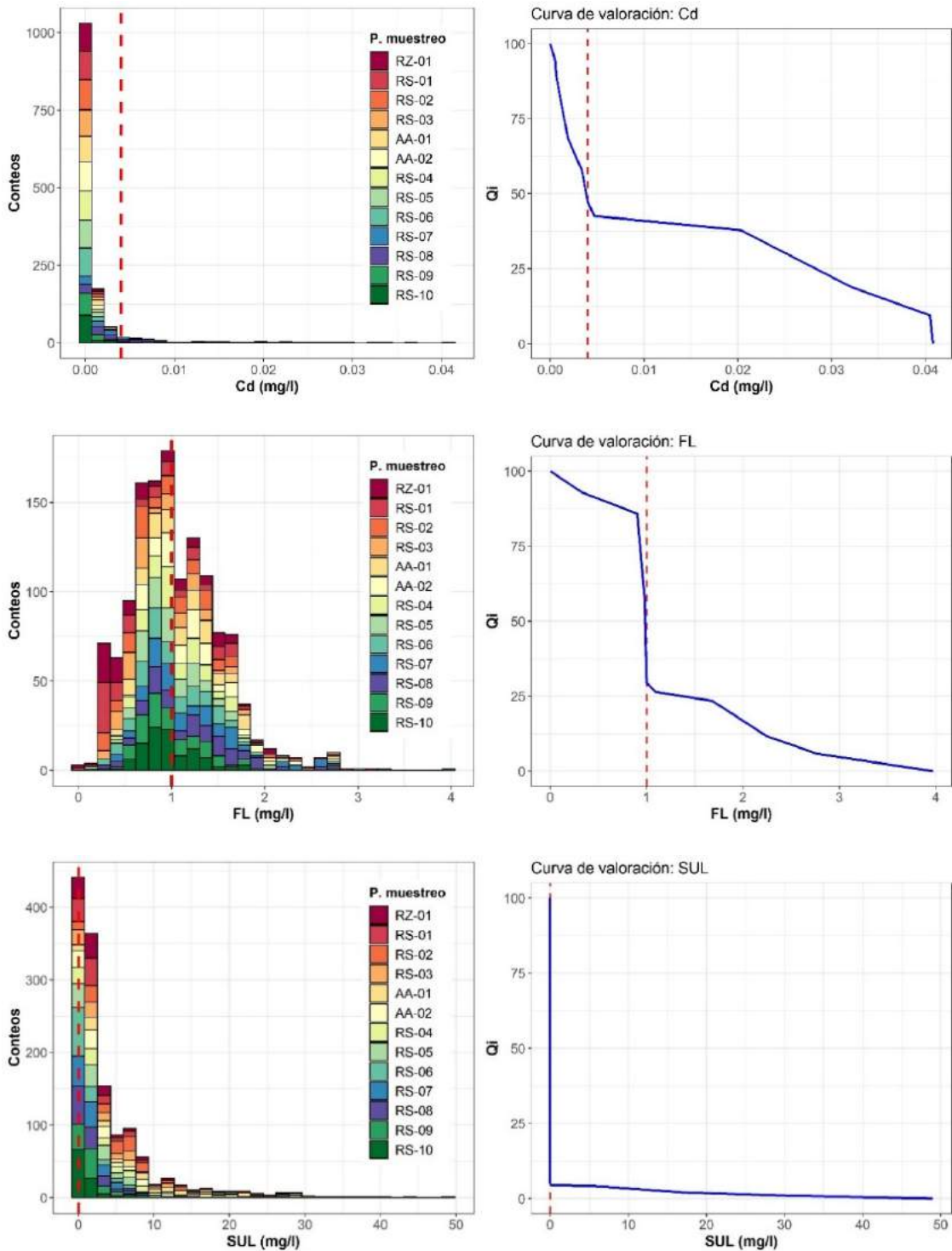
**Figura 16.** Curvas de valoración desarrollada para SST, NH<sub>3</sub>-N y GYA.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



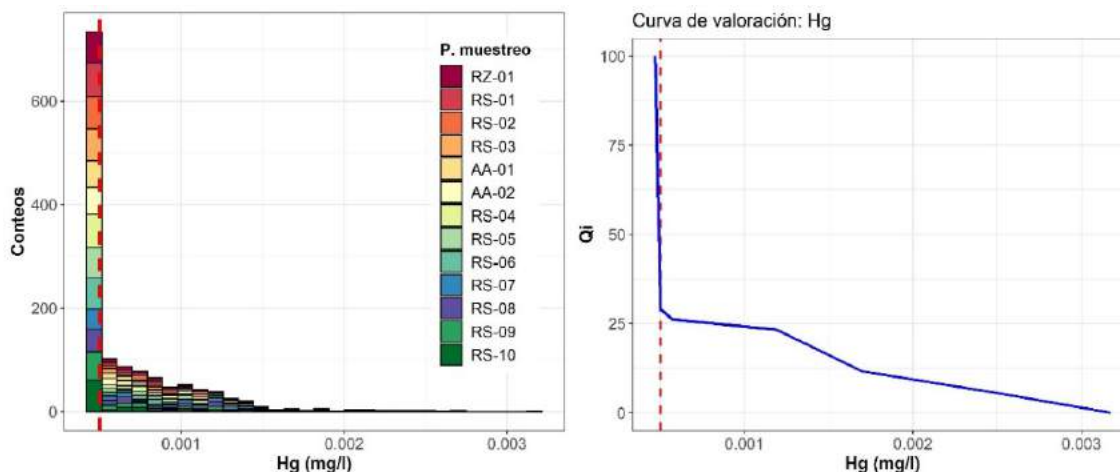
**Figura 17.** Curvas de valoración desarrollada para Pb, Zn y Cr.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 18.** Curvas de valoración desarrollada para Cd, FL y SUL.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

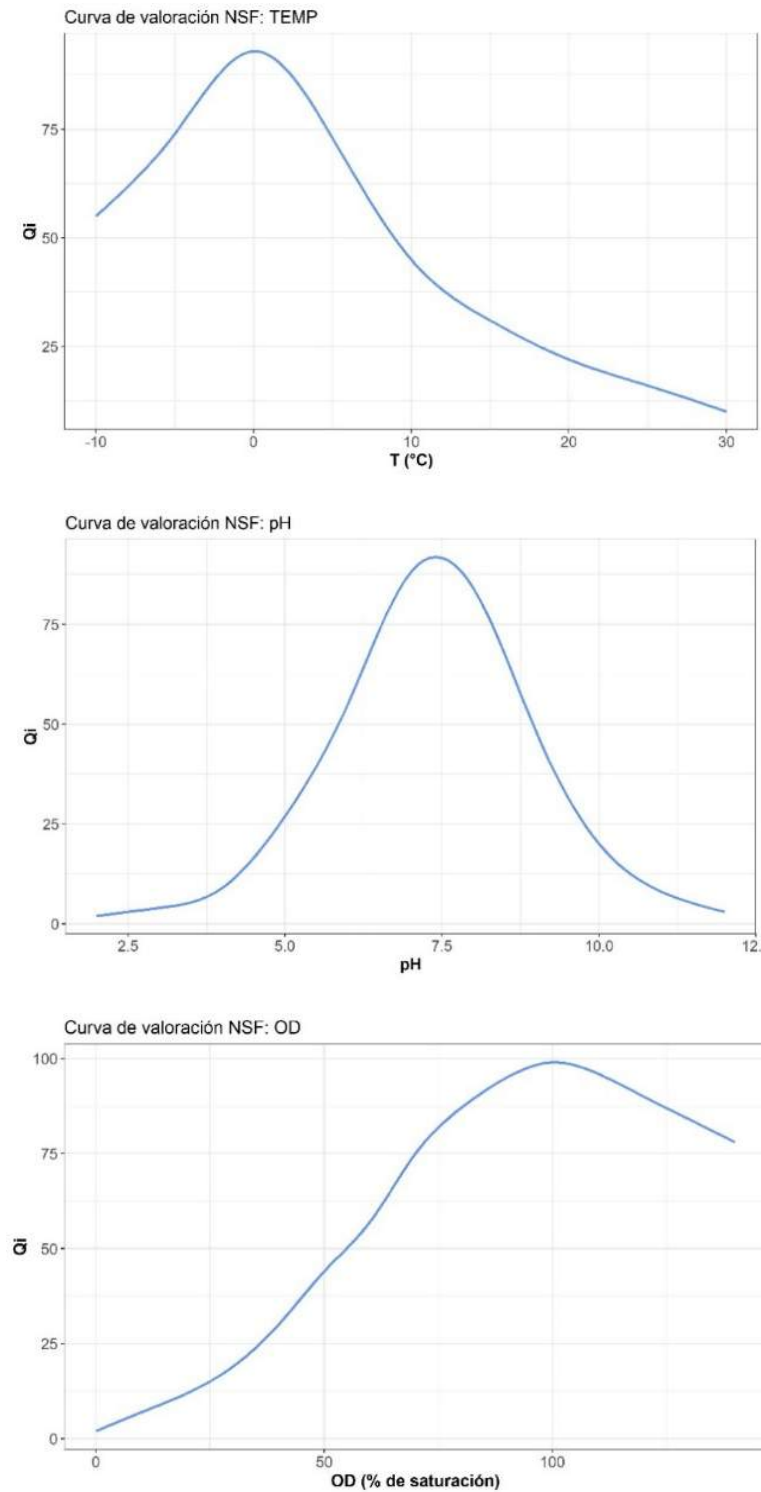


**Figura 19.** Curva de valoración desarrollada para Hg.

#### 4.4.2 Curvas de valoración desarrolladas con base en las curvas propuestas por la NSF para los parámetros T, pH and OD

Como se mencionó anteriormente, las curvas de valoración para T, pH and OD presentan un comportamiento particular. En el caso particular de las curvas de evaluación presentadas por la NSF, las curvas presentan máximos en 0°C, 7.5, 100%, para T, pH and OD respectivamente, como muestran la figura 20.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 20.** Curvas de valoración para T, pH and OD.

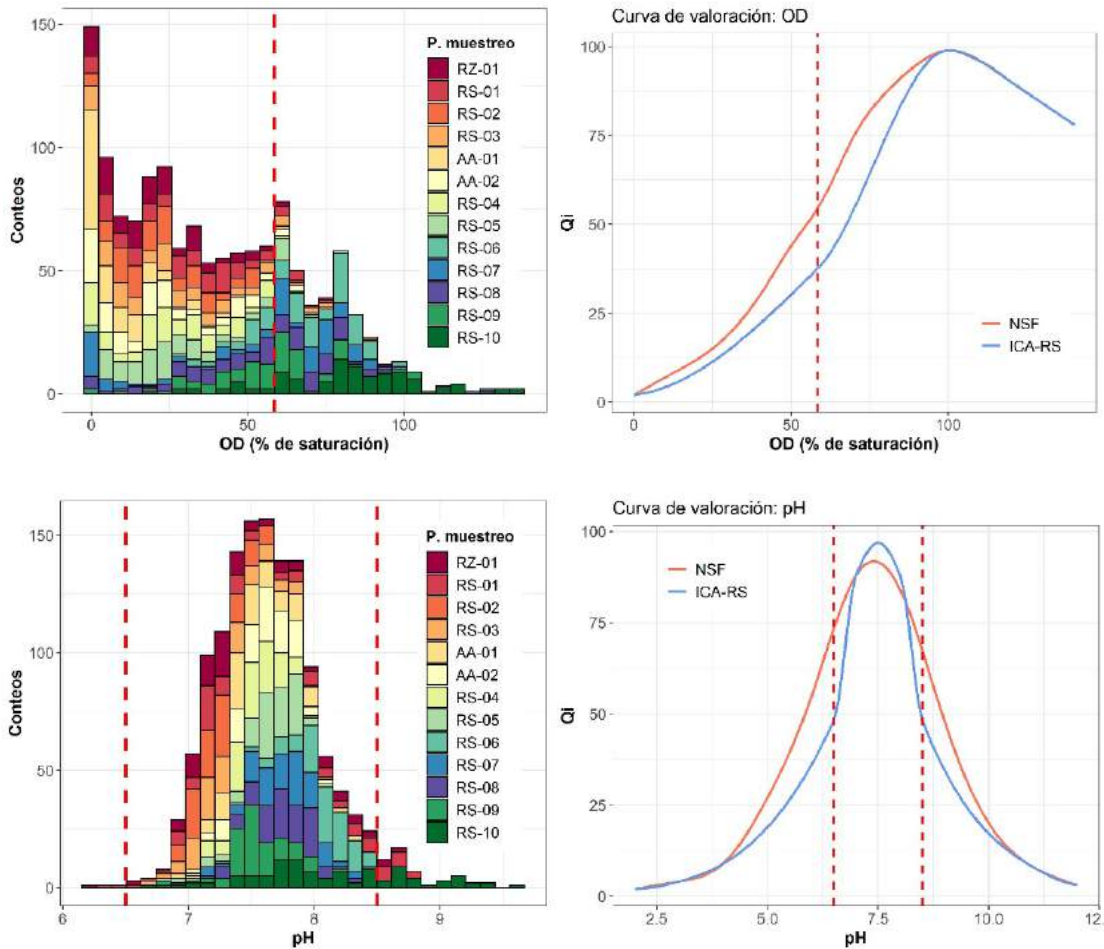
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Las curvas desarrolladas por la NSF para pH y OD fueron modificadas para que incorporaran los límites máximos permisibles sugeridos en la Ley Federal de Derechos (LFD, 2019). En el caso de pH, el intervalo permisible según la Ley Federal es de 6.5 a 8.5. En la curva de valoración de la NSF el pH alcanza el  $Q_i$  máximo de 98 en 7. La proporción de observaciones que no pertenecían al intervalo permisible es de 0.04. El  $Q_i$  correspondiente resultó ser de 48.22. La curva se ajustó por medio de un spline cúbico de tal forma que las respectivas parejas (pH,  $Q_i$ ) dadas por (6.5, 48.22), (7.5, 98) (8.5, 48.22) pertenezcan al polinomio y los valores de pH fuera del intervalo [6.5, 8.5] coincidan con los valores dados por la curva de la NSF.

La curva de valoración para T de la NSF fue utilizada sin ninguna modificación ya que la legislación mexicana para este parámetro utiliza un nivel de referencia que se selecciona por ser representativo de las condiciones naturales del cuerpo de agua y la NSF utiliza un criterio equivalente (Rai et al., 2012). Las curvas de valoración modificadas para OD y pH se muestran en la figura 21.



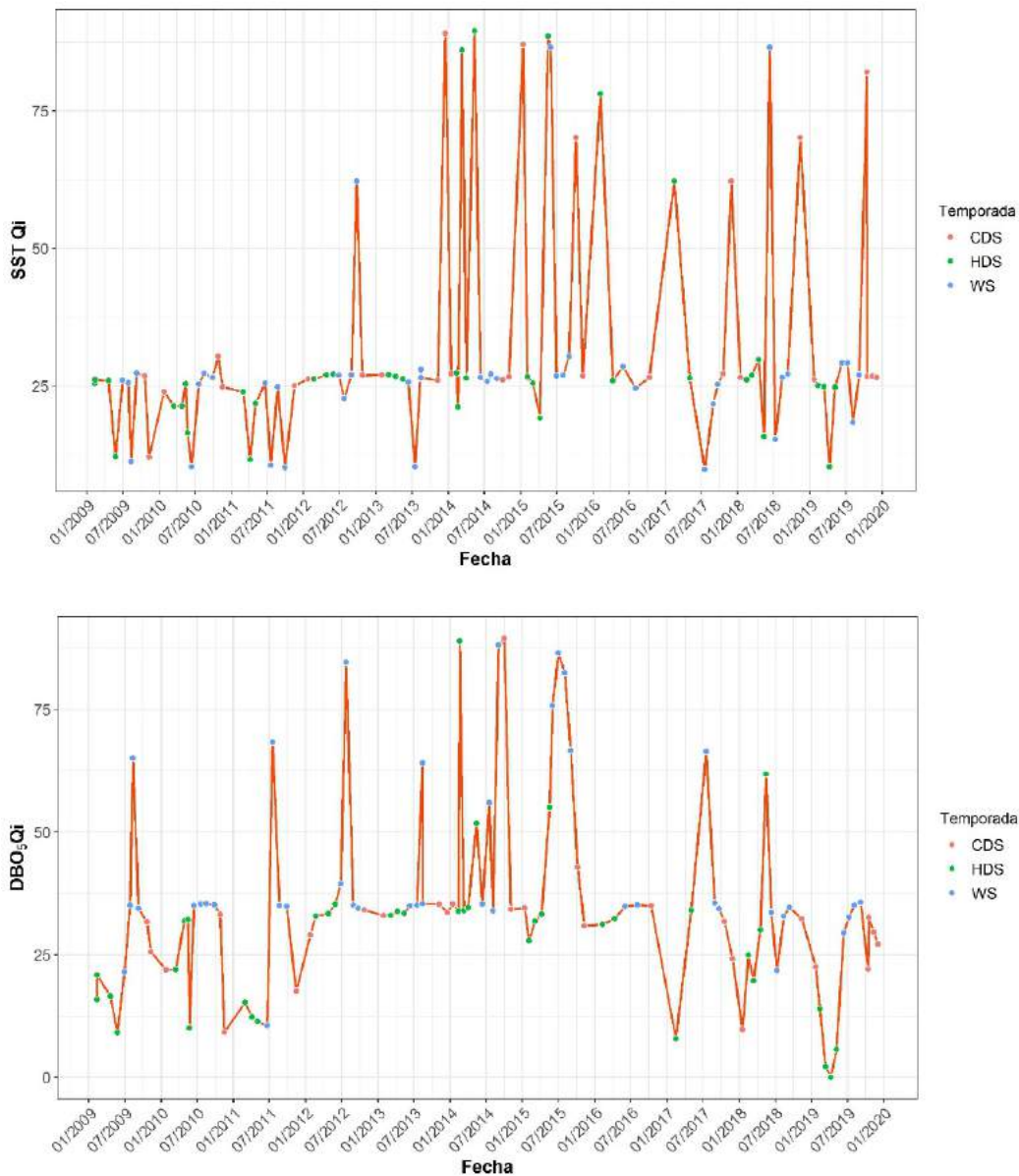
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 21.** Curvas de valoración modificadas para OD y pH.

Una vez obtenidas las curvas de valoración, se calcularon con ellas los subíndices para cada punto de muestreo y para todos los tiempos de muestreo de tal manera que se obtuvo la evolución temporal de cada subíndice para cada punto de muestreo. La figura 22 muestra, a manera de ejemplo, la evolución temporal de los subíndices SST y DBO<sub>5</sub> para la estación AA-01.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 22.** Evolución temporal de los subíndices SST y DBO<sub>5</sub> para la estación AA-01.

La tabla 15 muestra la media, la desviación estándar, los cuartiles y el rango intercuartílico para los subíndices obtenidos para todos los tiempos de muestreo y todos los puntos de muestreo. Se puede observar que, en promedio, los parámetros que se traducen en subíndices menores, considerando la Cuenca Río Santiago-Guadalajara de manera global, son NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>3</sub>-N, con subíndices promedio de 4.38 y 4.24 (en escala de 0 a 100),

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

respectivamente. Por lo contrario, los mayores subíndices promedio fueron para Pb y pH correspondientes a 95.06 y 88.80 respectivamente.

**Tabla 15.** Resumen estadístico de los  $Q_i$  por parámetro.

Parámetro	Media	sd	IQR	Mín.	Q25	Mediana	Q75	Máx.
DBO <sub>5</sub> QI	75.25	25.31	36.73	0.00	56.08	90.08	92.81	100.00
ODQI	27.16	26.87	34.03	2.00	5.47	17.49	39.50	99.00
PHQI	88.80	13.57	7.75	22.81	88.58	93.93	96.34	97.00
TEMPQI	75.24	14.46	24.13	34.38	64.35	77.28	88.48	93.01
CFQI	17.66	24.31	0.56	0.00	9.07	9.58	9.63	100.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> QI	4.38	4.60	0.39	0.00	4.20	4.54	4.59	100.00
SDTQI	41.58	33.07	68.00	0.00	17.92	19.07	85.92	100.00
SSTQI	59.34	32.29	65.34	0.00	26.70	70.15	92.04	100.00
NH <sub>3</sub> -NQI	4.24	3.79	0.37	0.00	4.16	4.44	4.53	100.00
GAQI	76.04	23.57	21.41	0.00	66.72	88.13	88.13	100.00
PBQI	95.06	10.34	2.95	0.00	97.05	100.00	100.00	100.00
ZNQI	15.46	5.46	2.81	0.00	14.80	15.58	17.61	100.00
CRQI	49.12	3.41	0.00	0.00	49.16	49.16	49.16	100.00
CDQI	87.82	15.24	5.27	0.00	89.46	94.73	94.73	100.00
FLQI	56.52	31.69	63.28	0.00	25.20	61.16	88.48	100.00
SULQI	4.47	5.28	0.37	0.00	4.22	4.48	4.59	100.00
HGQI	26.62	4.57	3.98	0.00	25.12	29.11	29.11	100.00

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

## 4.5 Determinación de los pesos del índice de calidad del agua

El índice de calidad del agua (ICA) es una media ponderada de los subíndices de los parámetros, cuya ecuación es dada por (Rai et al., 2012):

$$ICA = \sum_{k=1}^{17} w_k Q_{i_k}$$

donde  $0 \leq Q_{i_k} \leq 100$  es el subíndice de valoración del  $k$ -ésimo parámetro obtenido de la respectiva curva de valoración y  $w_k$  es el peso asignado a tal parámetro de acuerdo con la variación explicada (% de varianza) de los resultados del análisis de componentes principales con el objetivo de reflejar variaciones espaciales y temporales de la calidad del agua del Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara y evitar asignaciones subjetivas de importancia a cada parámetro.

### 4.5.1 ACP aplicado a los subíndices de los 17 parámetros seleccionados

Para determinar cuáles de los 17 subíndices brindaban mayor variabilidad se llevó a cabo un nuevo ACP para los  $Q_i$ 's. Con dicho análisis se obtuvieron 17 componentes principales, cuyos respectivos eigenvalores, varianzas explicadas y varianzas acumuladas se muestran en la tabla 16.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 16.** ACP para los  $Q_i$ 's.

Componente	Eigenvalor	% varianza	% varianza acumulada
PC1	3.23	18.99	18.99
PC2	2.37	13.96	32.95
PC3	1.67	9.83	42.78
PC4	1.64	9.67	52.45
PC5	1.08	6.33	58.78
PC6	1.04	6.10	64.88
PC7	0.94	5.52	70.40
PC8	0.84	4.92	75.32
PC9	0.77	4.54	79.86
PC10	0.68	4.01	83.87
PC11	0.56	3.30	87.17
PC12	0.50	2.91	90.09
PC13	0.45	2.62	92.71
PC14	0.41	2.43	95.14
PC15	0.37	2.18	97.32
PC16	0.32	1.86	99.18
PC17	0.14	0.82	100.00

Las respectivas componentes de cada eigenvector  $a_i$ ,  $i=1, \dots, 17$ ; satisfacen:

$$\langle a_i, a_i \rangle = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{i17}^2 = 1$$

Y los elementos de cada vector:

$$a_i = (a_{i1}^2, a_{i2}^2, \dots, a_{i17}^2)$$

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

pueden ser considerados como los coeficientes de una combinación lineal convexa, es decir, como los coeficientes de una media ponderada que reflejan la importancia de cada parámetro.

#### 4.5.2 Cálculo de 10 conjuntos de pesos potenciales

Considerando los 10 primeros vectores  $\alpha_i$  (correspondientes a las 10 primeras componentes principales que explican un 83.87% de la varianza acumulada), se calcularon 10 vectores de pesos  $\Omega_j, j=1, \dots, 10$  de la siguiente manera:

$$\Omega_j = \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_i \alpha_i}{P^{(j)}}$$

donde  $P^{(j)}$  es la varianza acumulada hasta la  $j$ -ésima componente principal, es decir

$$P^{(j)} = \sum_{i=1}^j \lambda_i$$

Cada  $\Omega_j$  es una media ponderada de los primeros  $j$  vectores  $\alpha_i$ , donde cada coeficiente es la varianza proporcional de la  $i$ -ésima componente principal respecto a la  $j$ -ésima varianza acumulada. En la tabla 17 se muestran los diez conjuntos de pesos obtenidos.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 17.** 10 conjuntos de pesos potenciales.

Parámetro	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$	$\Omega_9$	$\Omega_{10}$
DBO <sub>5</sub>	0.093	0.112	0.089	0.073	0.067	0.063	0.059	0.055	0.053	0.051
OD	0.018	0.057	0.084	0.069	0.064	0.058	0.054	0.053	0.053	0.054
pH	0.010	0.038	0.054	0.050	0.044	0.043	0.041	0.067	0.064	0.063
TEMP	0.002	0.011	0.049	0.045	0.046	0.051	0.047	0.065	0.064	0.064
CF	0.043	0.048	0.057	0.051	0.048	0.044	0.041	0.044	0.062	0.059
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.146	0.150	0.118	0.099	0.089	0.081	0.075	0.070	0.066	0.063
SDT	0.040	0.029	0.028	0.090	0.080	0.073	0.068	0.064	0.061	0.058
SST	0.040	0.048	0.057	0.066	0.060	0.058	0.054	0.052	0.055	0.057
NH <sub>3</sub> -N	0.141	0.112	0.091	0.075	0.072	0.076	0.070	0.066	0.063	0.060
GA	0.052	0.068	0.054	0.044	0.045	0.049	0.048	0.046	0.058	0.058
Pb	0.018	0.018	0.030	0.026	0.043	0.045	0.063	0.059	0.061	0.067
Zn	0.072	0.042	0.044	0.036	0.050	0.075	0.069	0.065	0.062	0.059
Cr	0.145	0.115	0.090	0.075	0.068	0.062	0.057	0.054	0.051	0.049
Cd	0.038	0.041	0.065	0.053	0.057	0.053	0.050	0.047	0.045	0.063
FL	0.034	0.021	0.017	0.085	0.077	0.070	0.065	0.061	0.059	0.056
SUL	0.102	0.086	0.067	0.055	0.058	0.065	0.061	0.057	0.054	0.051
Hg	0.006	0.007	0.007	0.009	0.032	0.035	0.079	0.075	0.071	0.070

El procedimiento para seleccionar el conjunto de pesos idóneo (entre los 10 potenciales) consiste en comparar los valores del ICA-RS calculados con cada uno de los conjuntos de pesos para identificar cuál de ellos refleja mejor las variaciones temporales y espaciales.

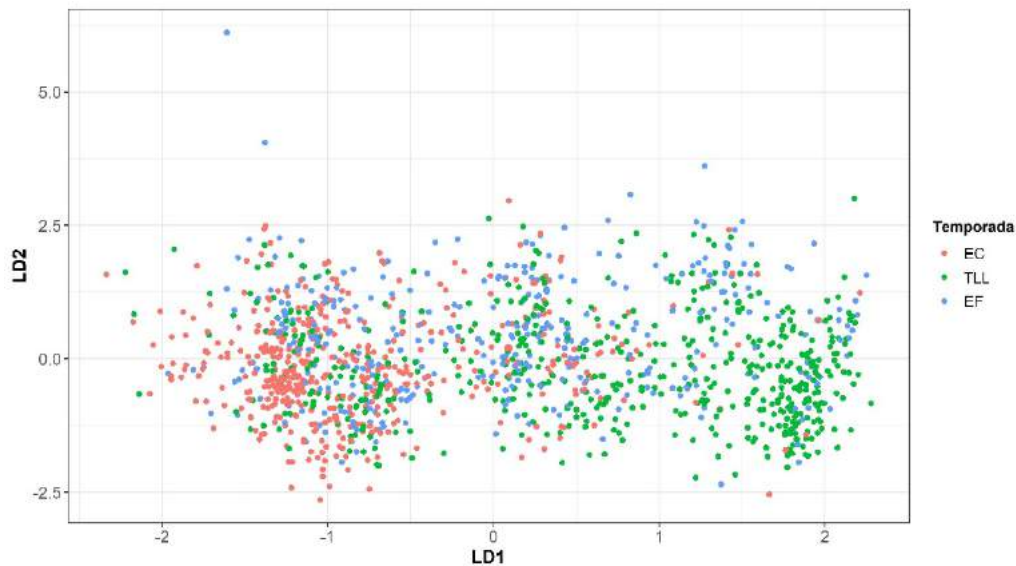
Con dicho propósito, inicialmente se llevó a cabo un par de análisis de discriminantes lineal (ADL) para detectar cómo, en conjunto, los valores del ICA-RS calculados con los 10 vectores de pesos distinguen entre temporadas del año (análisis de discriminantes temporal) y entre puntos de muestreo (análisis de discriminantes espacial). En el caso del ADL temporal, las estaciones del año consideradas fueron estiaje cálido (EC), temporada de lluvias (TLL) y estiaje frío (EF). Se encontró un valor de la lambda de Wilks de 0.68 (valores cercanos a cero de esta estadística indican que el conjunto de datos clasifica satisfactoriamente respecto a los grupos). A manera de ejemplo, se muestra la matriz de clasificación para el análisis discriminante temporal, y en ella se indica el porcentaje de

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

datos que el análisis asigna correctamente (tabla 18). Las funciones generadas discriminan satisfactoriamente entre las observaciones correspondientes a las temporadas EF y TLL (76.9% y 67.17% respectivamente) pero no así para el estiaje frío (EC). Esto se ve reflejado en el diagrama de dispersión de las funciones discriminantes lineales (LD1 y LD2). La primera función distingue los valores que pertenecen a EC (asignando los valores menores) y a TLL.

**Tabla 18.** Matriz de clasificación que resulta del ADL.

Temporada	%Correcto	Temporada asignada por ADL		
		EC	TLL	EF
EC	76.90%	362	74	36
TLL	67.17%	134	354	39
EF	18.95%	131	147	65
Total	58.19%	627	575	140



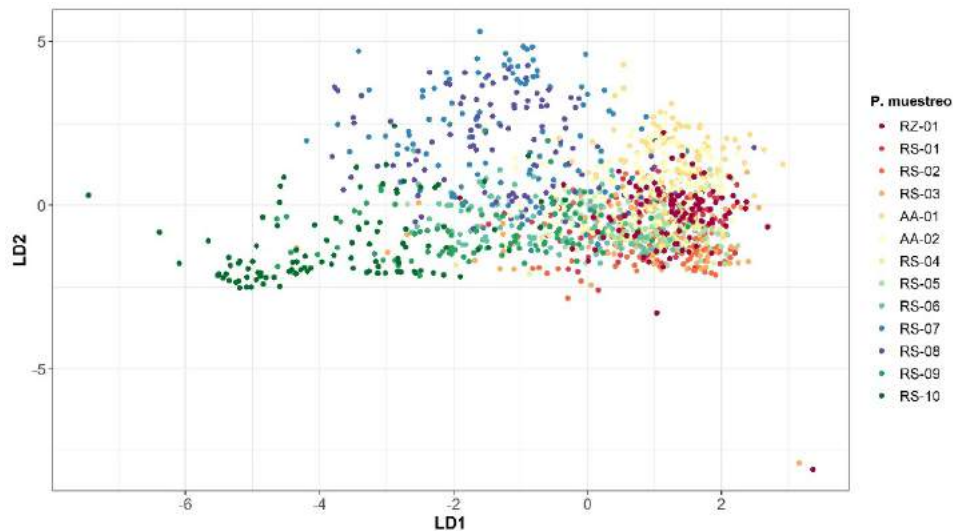
**Figura 23.** ADL temporal para el conjunto potencial de pesos  $\Omega_5$ .

En el caso del análisis de discriminantes lineal espacial (aplicado a las 13 estaciones) la estadística lambda de Wilks es de 0.050, ello indica que el conjunto de datos refleja satisfactoriamente la variación en la información de calidad de agua entre los puntos de



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

muestreo. En la figura 23 se muestra el diagrama de dispersión que resulta de las dos funciones de discriminación lineales, la primera de ellas (LD1) es la que distribuye y distingue de mejor manera los valores asignados a cada observación, pero, a diferencia del análisis temporal, la segunda función también contribuye para la clasificación entre puntos de muestreo.



**Figura 24.** ADL espacial para el conjunto potencial de pesos  $\Omega_5$ .

Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), tanto temporal como espacial, a los conjuntos de valores de ICA-RS obtenidos al aplicar cada uno de los vectores de pesos, y los respectivos valores  $p$  se muestran en la tabla 18. En el caso del ANOVA espacial (entre los 13 puntos de muestreo), se encontraron diferencias significativas con todos los vectores de pesos (los valores  $p$  resultaron mucho menores a 0.01). Estos resultados son consistentes con aquellos obtenidos en el análisis de discriminantes temporal, pues, los valores de ICA-RS obtenidos con todos los pesos distinguieron bien entre los puntos de muestreo. Este resultado no brindó un criterio para escoger el vector de pesos idóneo, sin embargo, brindó la certeza que cualquiera de ellos distinguía bien entre las 13 estaciones.

Las diferencias temporales (entre las temporadas EC, TLL y EF) también resultaron significativas de acuerdo con el ANOVA temporal. Los valores  $p$  más bajos son los

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

correspondientes a los vectores de pesos  $\Omega_4$  al  $\Omega_7$ . Para elegir uno de estos 4 vectores de pesos se realizaron pruebas de Tukey para las diferencias entre pares de las medias de los valores obtenidos agrupados por temporadas. En la tabla 19 se muestran los valores  $p$  obtenidos y, cabe señalar, con ningún vector de pesos se encuentran diferencias significativas entre la temporada de lluvia y el estiaje frío (como se había visto en el análisis de discriminantes lineal).

Como resultado de las pruebas de Tukey se determinó que los vectores de pesos que arrojaron los valores  $p$  menores fueron  $\Omega_4$  y  $\Omega_5$ . De este par se eligió el  $\Omega_5$  dado que considera 5 componentes principales y por lo tanto refleja una mayor varianza acumulada (comparado con el 4). La figura 25 muestra los diagramas de caja del ICA-RS que resultan al considerar el conjunto de pesos 5 y que reflejan las diferencias temporales y espaciales.

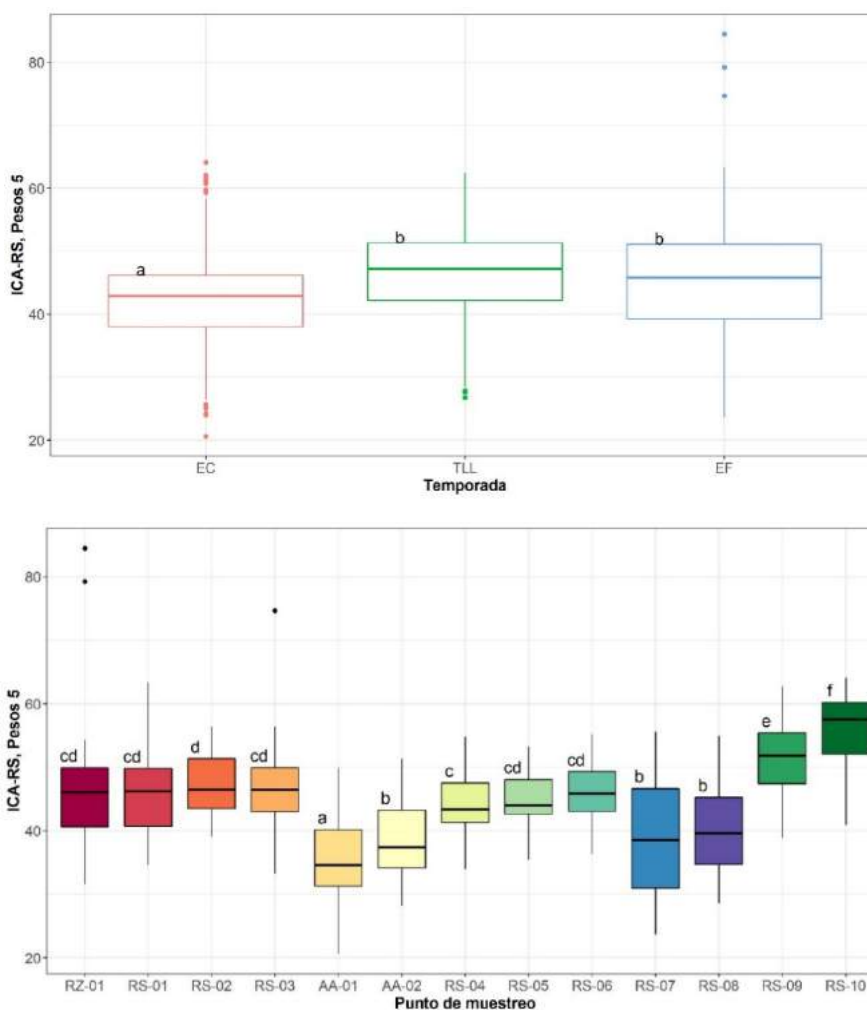
**Tabla 19.** Resultados de las pruebas ANOVA.

Vector de pesos	Valores $p$ , ANOVA temporal	Valores $p$ , ANOVA espacial
$\Omega_1$	$1.70 \times 10^{-008}$	$3.21 \times 10^{-177}$
$\Omega_2$	$7.92 \times 10^{-004}$	$1.83 \times 10^{-197}$
$\Omega_3$	$4.28 \times 10^{-002}$	$3.15 \times 10^{-212}$
$\Omega_4$	$2.02 \times 10^{-021}$	$7.57 \times 10^{-153}$
$\Omega_5$	$1.04 \times 10^{-019}$	$2.08 \times 10^{-157}$
$\Omega_6$	$5.45 \times 10^{-018}$	$2.05 \times 10^{-160}$
$\Omega_7$	$5.94 \times 10^{-018}$	$1.95 \times 10^{-160}$
$\Omega_8$	$5.51 \times 10^{-017}$	$3.92 \times 10^{-158}$
$\Omega_9$	$1.49 \times 10^{-013}$	$9.92 \times 10^{-174}$
$\Omega_{10}$	$5.04 \times 10^{-012}$	$1.58 \times 10^{-177}$

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 20.** Resultados de las pruebas de Tukey para los conjuntos potenciales de pesos.

Diferencia	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$	$\Omega_9$	$\Omega_{10}$
TLL-EC	$1.08 \times 10^{-006}$	$8.18 \times 10^{-003}$	$1.13 \times 10^{-001}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	$4.56 \times 10^{-013}$	$5.42 \times 10^{-012}$
EF-EC	$9.02 \times 10^{-007}$	$1.51 \times 10^{-003}$	$5.77 \times 10^{-002}$	$7.18 \times 10^{-011}$	$2.92 \times 10^{-010}$	$2.22 \times 10^{-009}$	$1.52 \times 10^{-009}$	$3.02 \times 10^{-008}$	$3.06 \times 10^{-007}$	$1.59 \times 10^{-006}$
EC-TLL	$8.65 \times 10^{-001}$	$6.90 \times 10^{-001}$	$8.64 \times 10^{-001}$	$1.34 \times 10^{-001}$	$1.70 \times 10^{-001}$	$2.11 \times 10^{-001}$	$2.36 \times 10^{-001}$	$1.23 \times 10^{-001}$	$3.26 \times 10^{-001}$	$4.06 \times 10^{-001}$



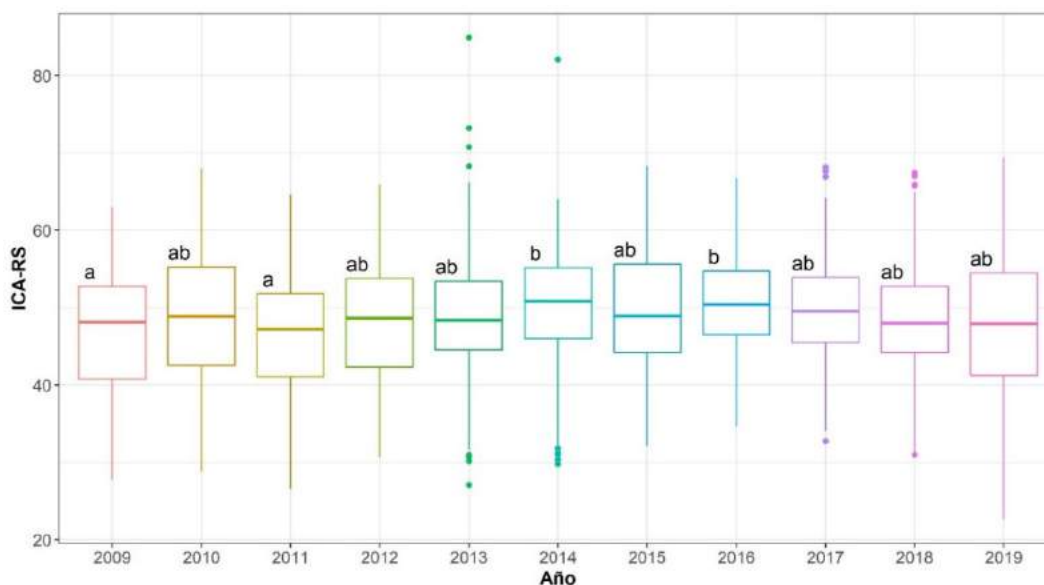
**Figura 25.** Diagramas de cajas que reflejan las variaciones temporales y espaciales al considerar el conjunto de pesos  $\Omega_5$ .

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

#### 4.6 Aplicación del Índice de Calidad de Agua del Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara (ICA-RS)

Una vez desarrollado el índice de calidad de agua específico para Río Santiago (ICA-RS), éste fue aplicado para evaluar la calidad del agua considerando la evolución temporal, así como las tendencias espaciales.

La figura 26 muestra la evolución temporal del valor global del ICA-RS considerando el comportamiento global del cuerpo de agua en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara. De acuerdo con la tendencia histórica, el ICA-RS muestra una mejoría global a partir de 2012 y alcanza los valores más altos entre 2014 y 2016. El índice global refleja la calidad de todo el tramo estudiado, comprendido por las 13 estaciones de monitoreo ya mencionadas.

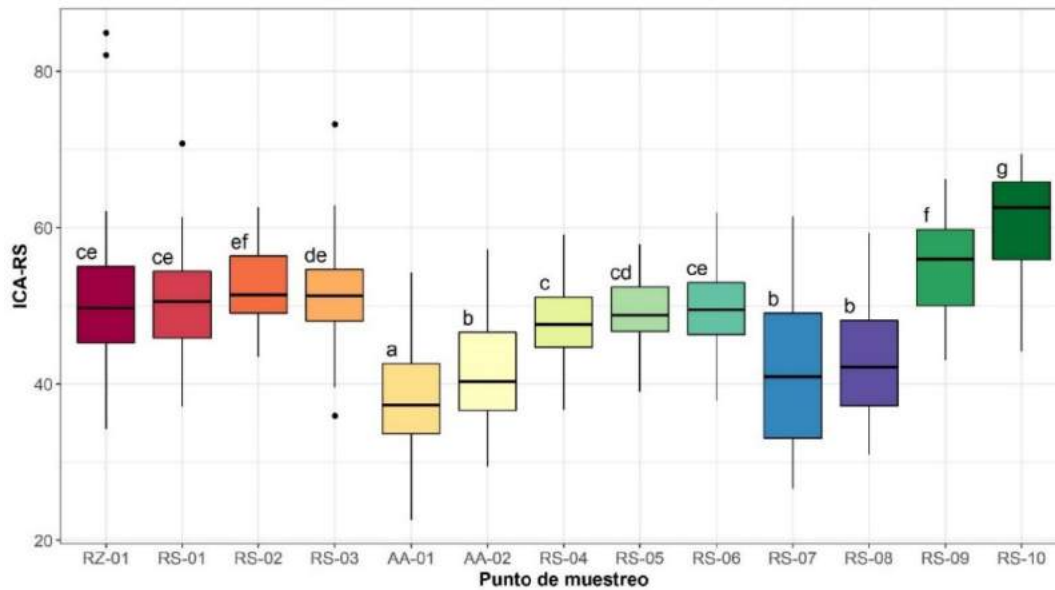


**Figura 26.** Distribución de los valores anuales del índice global.

En la figura 27 se muestra la comparación de los valores globales del ICA-RS para cada estación durante el intervalo de tiempo estudiado. En dicha figura se pueden observar diferencias significativas en la calidad del agua de los diferentes puntos de muestreo. Los valores más bajos corresponden a las estaciones AA-01, AA-02, RS-07 y RS-08, mientras que los valores más altos corresponden a las estaciones RS-09 y RS-10. Estas variaciones son el resultado de las condiciones territoriales de la cuenca (el uso de suelo, las actividades

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias predominantes, así como la densidad poblacional y el estado de conservación de los ecosistemas). La capacidad de un índice de calidad del agua de reflejar las variaciones espaciales ha sido como un criterio para evaluar la funcionalidad de los índices de calidad de agua ecosistema-específicos (Gradilla-Hernández et al., 2020).

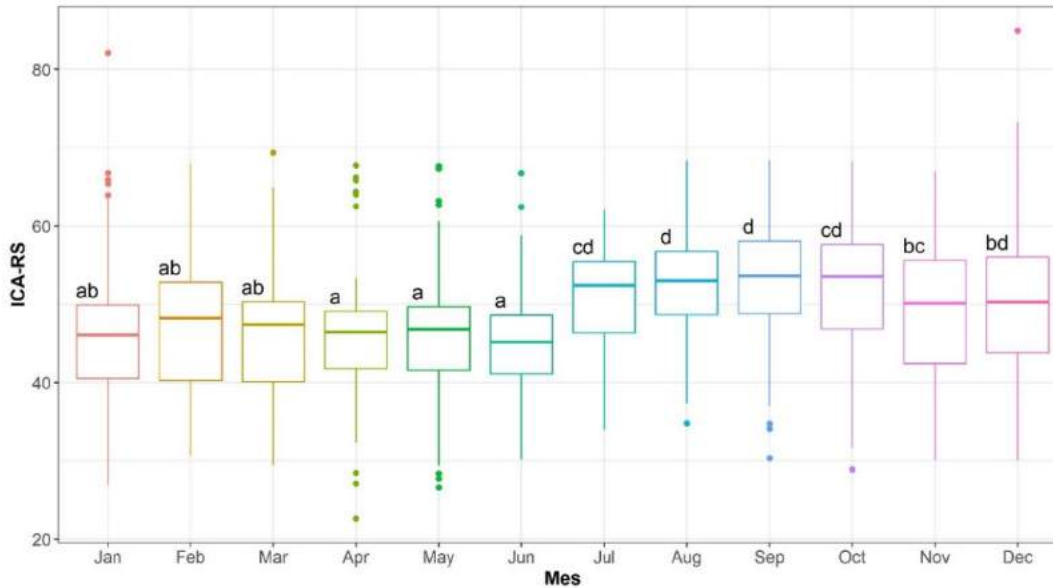


**Figura 27.** Distribución de los valores históricos del ICA-RS por punto de muestreo.

En la figura 28 se muestran la tendencia anual promedio del ICA-RS a lo largo de una década. Se presentan los promedios mensuales históricos del ICA-RS para cada uno de los meses del año. En dicha figura puede apreciarse que durante los meses del estiaje cálido (febrero-junio) hay un deterioro en la calidad del agua del río que resulta de la mayor evaporación ocasionada por mayores temperaturas y que conllevan un proceso de concentración de los contaminantes del agua. Este comportamiento es característico de los cuerpos de agua en las latitudes tropicales (Gradilla-Hernández et al., 2020). De julio a septiembre se observa una mejora en la calidad de agua correspondiente con la temporada de lluvias, que conlleva un proceso de dilución de contaminantes, y posteriormente un decaimiento en la temporada de estiaje frío que se agudiza en el estiaje cálido. Este comportamiento cíclico anual guarda relación con los procesos de dilución y concentración dados por la precipitación y evaporación natural. La capacidad de un índice de calidad de agua de reflejar las variaciones estacionales típicas es otro criterio para evaluar la

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

funcionalidad de un índice de calidad de agua ecosistema-específico (Gradilla-Hernández et al., 2020).



**Figura 28.** Datos históricos del ICA-RS por mes.

#### 4.6.1 Mapas de color

Con los valores obtenidos del ICA-RS es posible seleccionar fechas puntuales o intervalos de tiempo para su proyección en mapas de color siguiendo los niveles de evaluación propuestos por NSF (tabla 2) tomando la misma escala de color propuesta para los indicadores de CONAGUA (tabla 4), quedando de la siguiente manera:

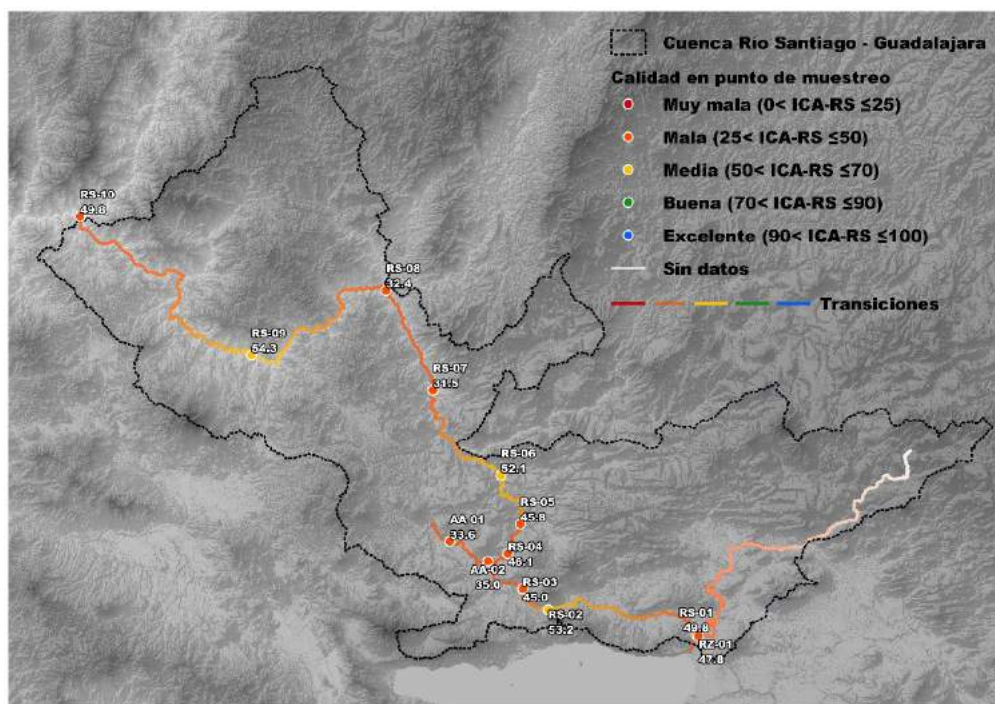
**Tabla 21.** Clasificación de la calidad de agua para el ICA-RS.

Valor	Calidad	Consideraciones de uso	Color
$0 < \text{ICA-RS} \leq 25$	Muy mala	Contacto directo restringido	Rojo
$25 < \text{ICA-RS} \leq 50$	Mala	Contacto directo limitado	Naranja
$50 < \text{ICA-RS} \leq 70$	Media	Uso con precaución	Amarillo
$70 < \text{ICA-RS} \leq 90$	Buena	Muy pocas limitaciones	Verde
$90 < \text{ICA-RS} \leq 100$	Excelente	Completamente utilizable	Azul

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

A manera de ejemplo, se muestran las figuras 29, 30 y 31 en donde se expone el valor y clasificación de color del ICA-RS para cada punto de muestreo y de manera ilustrativa se muestra sobre el cauce del río la transición entre las clasificaciones para cada punto mediante la interpolación del color. Para lo anterior se tomaron 3 fechas;

- Febrero de 2009 por ser la primera medición registrada (figura 29);
- Febrero de 2014 por ser una fecha intermedia y haber tenido en estado óptimo la operación de la PTAR El Ahogado (figura 30);
- Diciembre 2019 por ser la última fecha calculada con el ICA-RS al momento de la elaboración del presente reporte (figura 31).



**Figura 29.** Mapa de color con el valor del ICA-RS para febrero de 2009.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

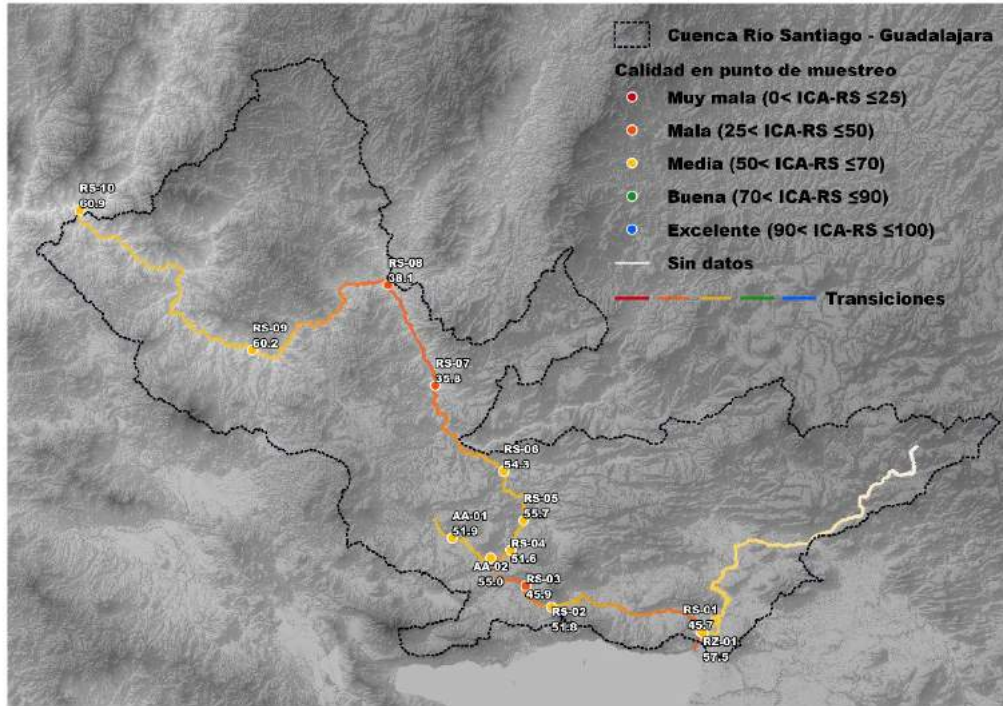


Figura 30. Mapa de color con el valor del ICA-RS para febrero 2014.

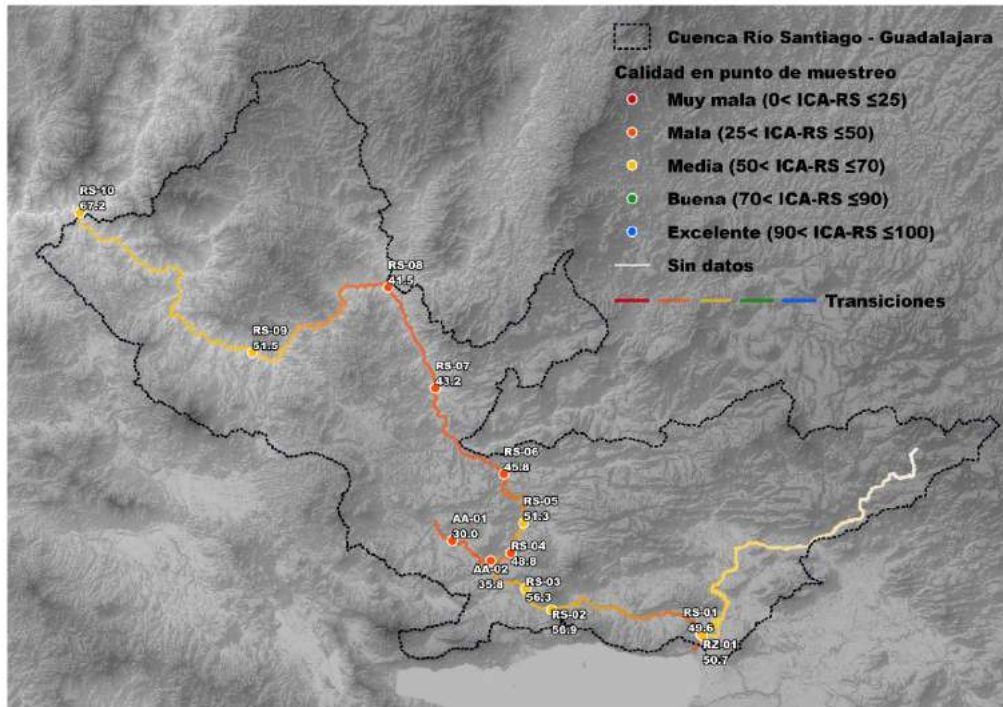


Figura 31. Mapa de color con el valor del ICA-RS para diciembre de 2019.



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

**Tabla 22.** Valores calculados del ICA-RS para las fechas mencionadas.

Punto de muestreo	FEB-09	FEB-14	DIC-19
RZ01	47.82	57.53	50.71
RS01	49.81	45.70	49.58
RS02	53.19	51.83	56.93
RS03	45.02	45.88	56.30
AA01	33.64	51.87	30.02
AA02	35.03	55.02	35.83
RS04	46.13	51.58	48.85
RS05	45.83	55.68	51.25
RS06	52.12	54.35	45.81
RS07	31.52	35.86	43.17
RS08	32.41	38.11	41.49
RS09	54.32	60.24	51.55
RS10	49.82	60.93	67.21

## 5 DISCUSIÓN

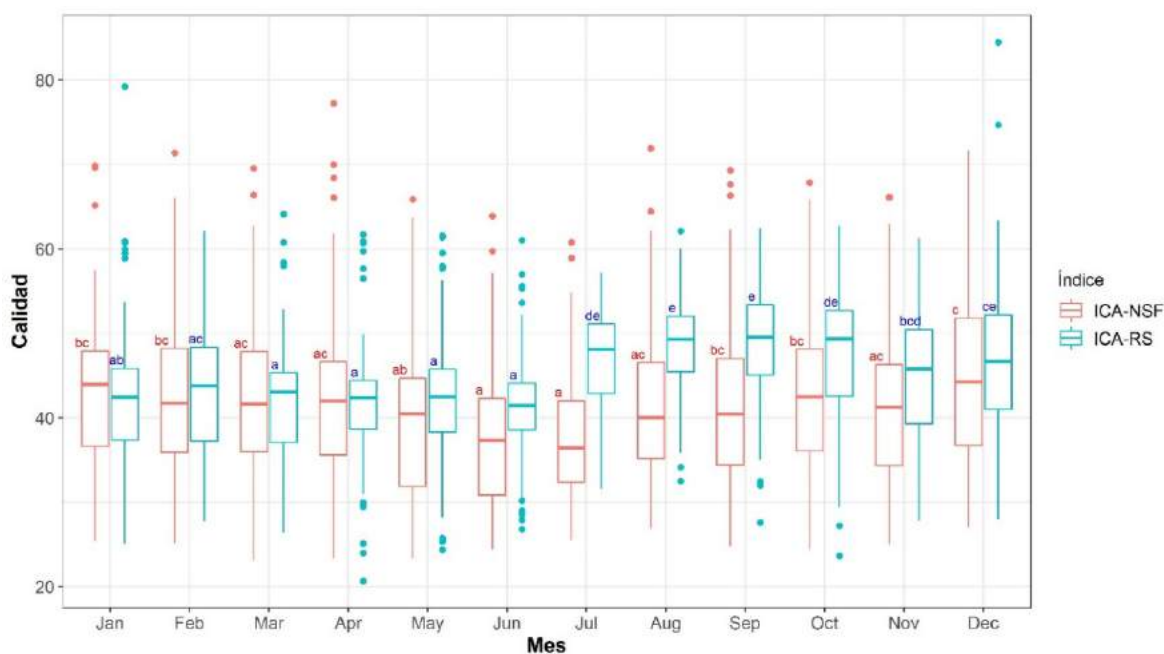
### 5.1 Comparación de índices de calidad de agua

Como se mencionó anteriormente, un índice de calidad de agua debe de ser capaz de detectar las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua de los cuerpos en cuestión (Gradilla-Hernández et al., 2020). El ICA desarrollado específicamente para el Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara refleja esas diferencias, sin embargo, es posible compararlo con otros índices usados internacionalmente y desarrollados para otras latitudes. El concepto de indexación de agua con un valor numérico para expresar su calidad, basado en mediciones físicas, químicas y biológicas, fue desarrollado en 1965 por la *National Sanitation Foundation* (ICA-NSF) con sede en EE. UU. En este índice, la selección de parámetros se basa en el método Delphi y estos modelos se formularon en formas aditivas y multiplicativas. Los modelos se implementaron en varios cuerpos de agua de los EUA, sin embargo, aún se sigue trabajando en mejorar su capacidad de representar la situación real de los cuerpos de agua de este país en lo referente a la calidad del agua (Lumb et al., 2011).

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

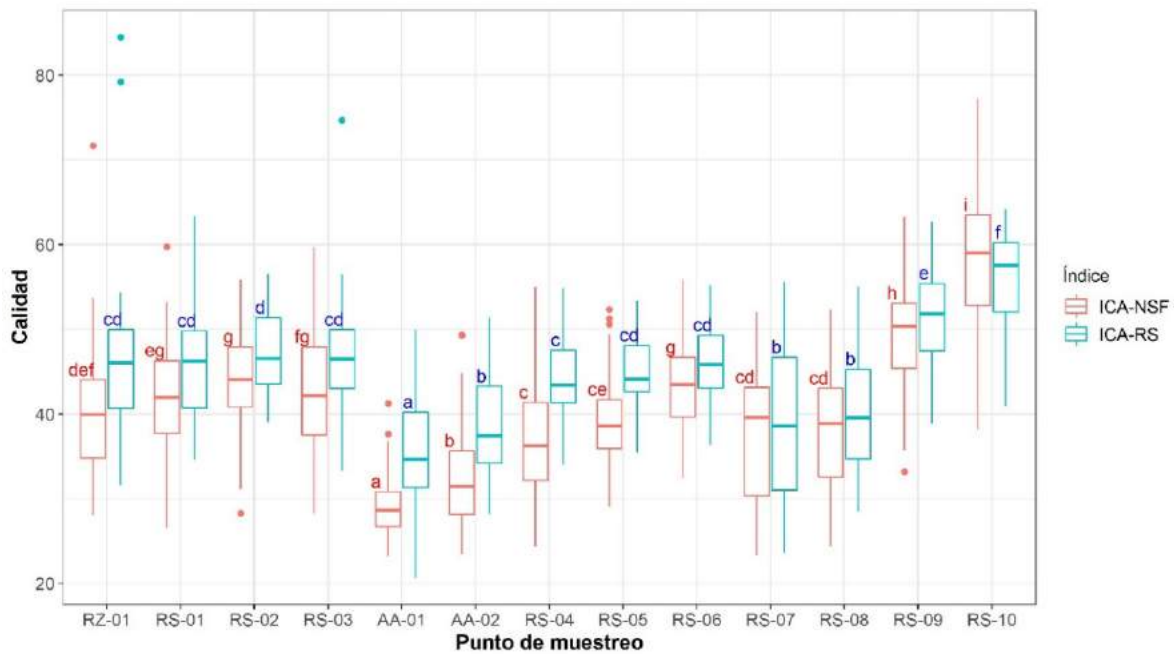
La comparación entre ambos índices (ICA-RS e ICA-NSF) permite establecer algunas de las ventajas del desarrollo de un índice específico para el cuerpo de agua en cuestión (ICA-RS) generado a partir de los datos históricos de calidad del agua que dan cuenta de las características específicas de la región.

En la figura 32 se muestran los valores históricos mensuales promedio de los ICA-RS e ICA-NSF para la última década. En la figura puede apreciarse que el ICA-RS refleja claramente las variaciones estacionales típicas que pueden esperarse para los cuerpos de agua tropicales y subtropicales correspondientes a procesos de dilución que resultan de precipitaciones intensas a lo largo de la temporada de lluvias (Gradilla-Hernández et al., 2020). Por su parte, se observa que el ICA-NSF no reflejó claramente las variaciones estacionales ocasionadas por el temporal de lluvias. Ambos ICAs mostraron las variaciones espaciales esperadas y comparten, en general, los valores más altos y bajos en los mismos puntos de muestreo (figura 33).



**Figura 32.** Datos históricos por mes de calidad de agua con el ICA-RS y el ICA-NSF.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 33.** Datos históricos para puntos de muestreo con el ICA-RS y el ICA-NSF.

El ICA desarrollado por CONAGUA (ICA-CONAGUA), cuya aplicación se propuso para todo el territorio mexicano, incluye 18 parámetros y presenta sus respectivos pesos propuestos (tabla 3) (SEMARNAT, 2019). Sin embargo, no se presentaron las curvas de evaluación, por lo que es imposible calcular el valor del ICA. Asimismo, no se ha transparentado la metodología usada para su desarrollo. Más aun, la literatura internacional señala claramente una tendencia en el uso de indicadores de calidad de agua ecosistema-específicos, los cuales presentan una serie de ventajas a los índices de calidad de agua generalizados o que pretenden usarse para grandes extensiones territoriales (Rangeti et al., 2015; Gradilla-Hernández et al., 2020).

Aunado a lo anterior, CONAGUA reconoce que debido al crecimiento de la población y de las actividades industriales se vierten al agua diversos compuestos tóxicos, tales como metales pesados, los cuales no se consideran dentro de sus 18 parámetros, además de compuestos orgánicos, el ICA es parcial y no corresponde a las condiciones ambientales reales (SEMARNAT, 2019).

Por su parte, la metodología propuesta en este trabajo permite integrar los parámetros más relevantes para las condiciones particulares del cuerpo de agua. La tabla 23 muestra

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

los parámetros considerados en cada uno de los índices que se están comparando: ICA-RS, ICA-NSF y el anteriormente propuesto por CONAGUA, ICA-CONAGUA. Cabe mencionar, que los pesos propuestos por CONAGUA no suman la unidad, como lo proponen las metodologías más comunes.

**Tabla 23.** Parámetros y pesos de los tres ICA.

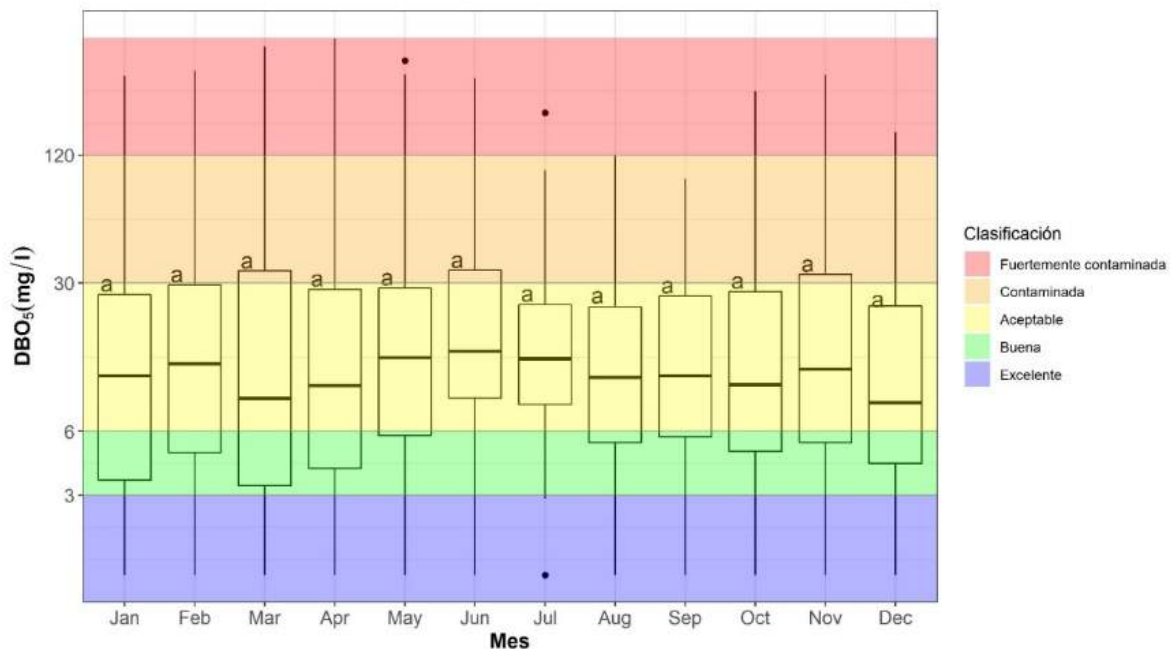
Parámetro	ICA-RS	Peso ICA-NSF	ICA-CONAGUA
Temperatura	0.05	0.1	
Sólidos suspendidos totales	0.07		1.00
Sólidos disueltos totales	0.08		0.50
Potencial de hidrógeno	0.05	0.11	1.00
Oxígeno disuelto	0.06	0.17	5.00
Demanda bioquímica de oxígeno	0.07	0.11	5.00
Nitrógeno de nitratos	0.08	0.10	2.00
Nitrógeno amoniacal	0.04		2.00
Grasas y aceites	0.05		2.00
Cadmio	0.06		
Cromo	0.07		
Mercurio	0.04		
Plomo	0.05		
Zinc	0.04		
Fluoruros	0.08		
Sulfuros	0.06		
Coliformes fecales	0.05	0.16	4.00
Fósforo total		0.10	
Turbidez		0.08	0.50
Sólidos totales		0.07	
Cloruros			0.50
Dureza total			1.00
Color			1.00
Alcalinidad			1.00
Fosfatos totales			2.00
Conductividad			2.00
Sustancias activas al azul de metileno			3.00
Coliformes totales			3.00

Tras reconocer dichas debilidades, la propuesta de CONAGUA fue sustituir el ICA-CONAGUA por el uso de tres indicadores (DBO<sub>5</sub>, DQO y SST), los cuales clasifican individualmente la calidad del agua de acuerdo con intervalos específicos. Dichos

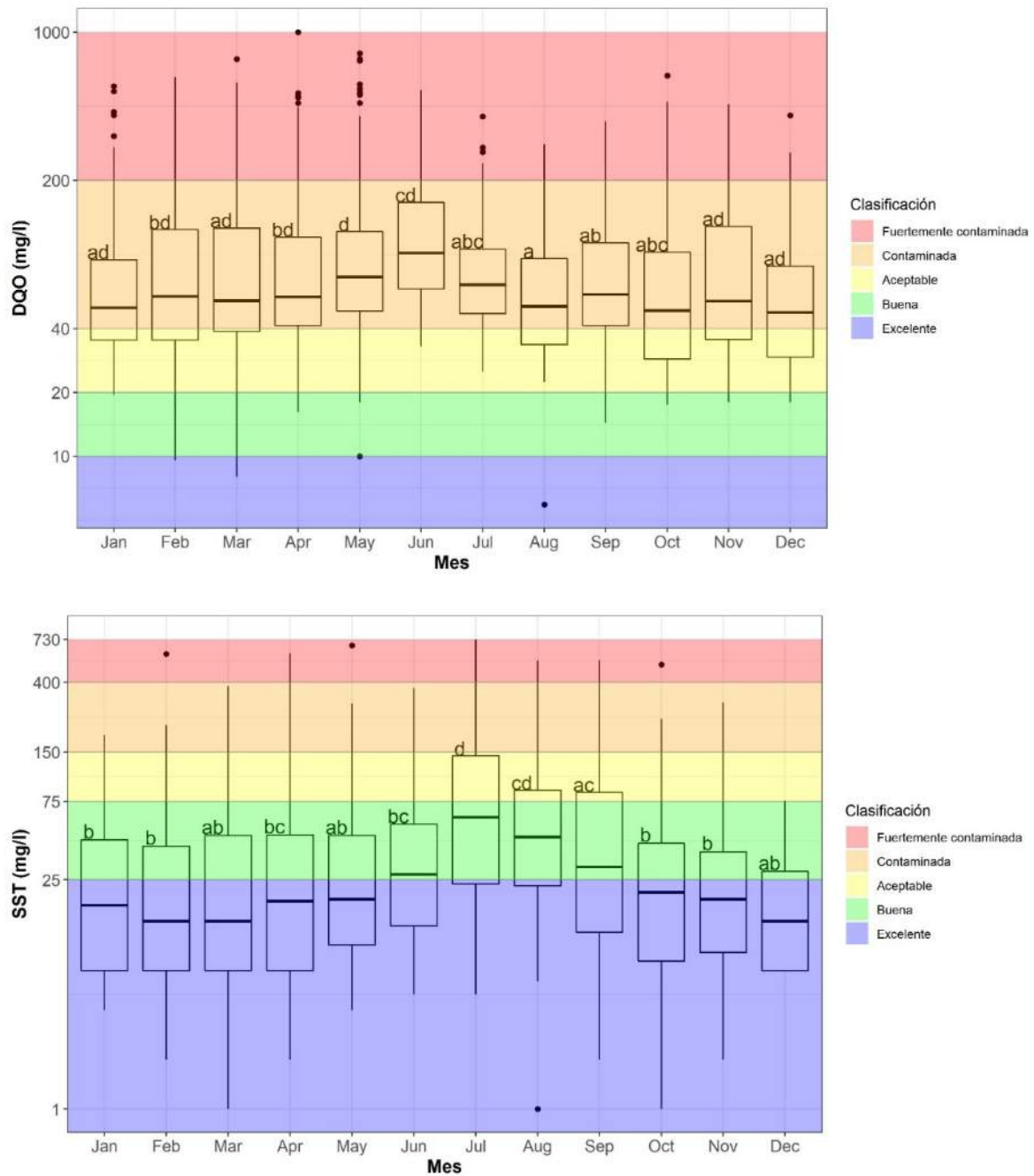
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

indicadores no se transforman a una escala numérica equivalente (0 – 100), sino que siguen utilizando una escala común de concentraciones expresadas en miligramo por litro. La tabla 3 presenta los criterios de evaluación desarrollados por CONAGUA para los tres indicadores mencionados. Es importante señalar que los indicadores propuestos por CONAGUA no se integran en un índice, sino que se presentan de manera desarticulada. Asimismo, resulta limitado evaluar la calidad del agua considerando únicamente estos tres indicadores (CONAGUA, 2016).

Al aplicar esta clasificación propuesta por CONAGUA para los tres indicadores a los datos de calidad de agua del Río Santiago se generó la figura 34. Se puede apreciar, que, de manera global, en el caso de DBO<sub>5</sub> se obtiene una calidad predominantemente aceptable, en el caso del DQO se obtiene una calidad predominantemente contaminada y para SST se obtiene una calidad predominantemente excelente. Los resultados anteriores pueden resultar confusos al momento de comunicar la calidad del agua. Adicionalmente, los indicadores de DBO<sub>5</sub> y DQO no exhiben las variaciones temporales esperadas, mientras que el indicador SST da indicios de ellas.



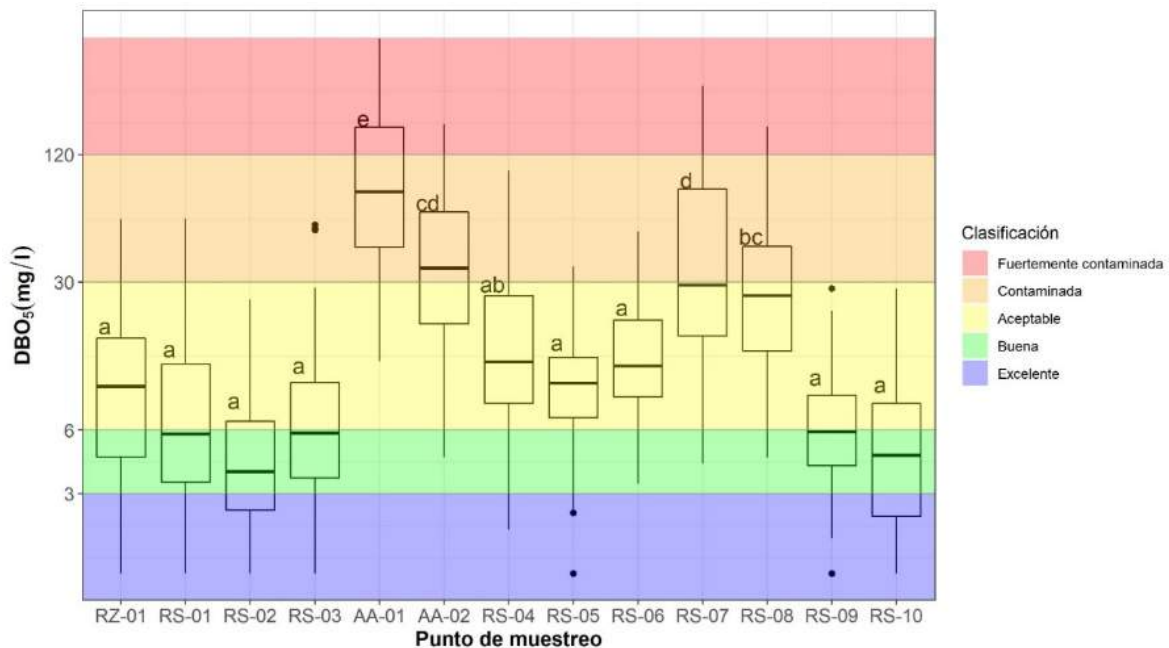
Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



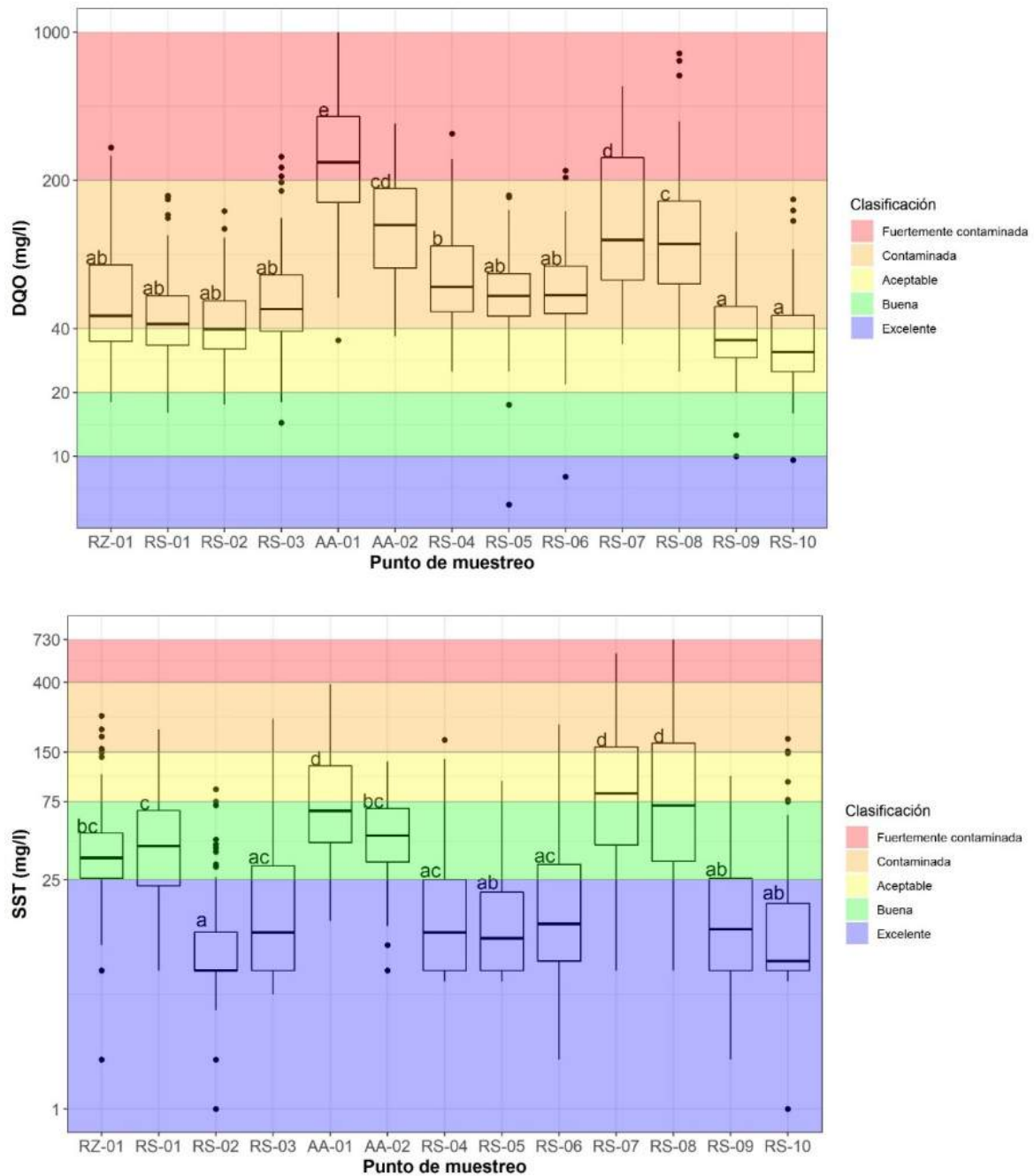
**Figura 34.** Evaluación de la calidad del agua de acuerdo con los indicadores propuestos por CONAGUA (tendencias estacionales) (SEMARNAT, 2019).

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

En la figura 35 se muestra la calidad del agua promedio para la última década para cada punto de muestreo considerando los indicadores de CONAGUA. Se observa que en el caso de DBO<sub>5</sub>, la calidad de agua resulta predominante aceptable con una variación significativa entre los puntos de muestreo. Igualmente se pueden identificar variaciones espaciales al comparar los indicadores de DQO y SST. Si bien los indicadores reflejan las variaciones espaciales esperadas, no es posible concluir una calidad de agua ya que los resultados se presentan de manera desarticulada por indicador y no se resumen en un índice de calidad de agua.



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>



**Figura 35.** Evaluación de la calidad del agua de acuerdo con los indicadores de CONAGUA por punto de muestreo (tendencia global para la última década) (SEMARNAT, 2019).



Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

En la tabla 24 se muestra un resumen de las características y la funcionalidad de los dos índices analizados (ICA-RS e ICA-NSF) así como los indicadores propuestos por (SEMARNAT, 2019). Con esta comparación se concluye que el ICA-RS reúne las características deseables para los índices de calidad de agua. El ICA-RS integra parámetros de calidad de agua de relevancia particular para el Río Santiago en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara, además de reflejar las variaciones espaciales y temporales esperadas e incorporar en su algoritmo los valores recomendados para la protección de la vida acuática (LFD, 2019).

**Tabla 24.** Comparación de los dos índices (ICA-RS e ICA-NSF) y el índice antes propuesto por CONAGUA al igual que los indicadores propuestos actualmente por CONAGUA (CONAGUA, 2016; SEMARNAT, 2019).

	ICA-RS	ICA-NSF	ICA-CONAGUA	CONAGUA (indicadores)
Refleja las variaciones temporales	Sí	Sí	NA	No
Refleja las variaciones espaciales	Sí	Sí	NA	Sí
Muestra las oscilaciones típicas del ciclo anual	Sí	No	NA	No
Incluye el rango completo de las concentraciones observadas para cada parámetro en las curvas de evaluación.	Sí	No	NA	No
Integra criterios para la protección de la vida acuática basados en la normativa vigente mexicana.	Sí	No	NA	No
Considera condiciones particulares del cuerpo de agua (distribución histórica de los datos de calidad de agua)	Sí	No	No	No

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque la metodología propuesta para el desarrollo del algoritmo y cálculo del ICA-RS es compleja, los resultados de la aplicación del mismo en este documento permite a los tomadores de decisiones contar con una herramienta eficaz para interpretar la amplia gama de datos obtenidos a través de las campañas de monitoreo regulares que lleva a cabo la Comisión Estatal de Agua del Estado de Jalisco en la Cuenca Río Santiago-Guadalajara y

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

de esta forma generar fácilmente un valor que pueda utilizarse para guiar las políticas públicas orientadas a la recuperación del río.

El nuevo ICA-RS se puede utilizar igualmente para evaluar de forma objetiva las mejoras que se hayan establecido para la calidad del agua del río como resultado de la implementación de los proyectos de recuperación. De esta forma, el ICA-RS ofrece una línea de base para delimitar con precisión las estrategias que deben implementarse para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del agua del río y de esta forma alcanzar el estado deseable del mismo. Las condiciones deseables de calidad del agua deberán balancear la necesidad de recuperar las funciones del río como una fuente de agua para los diferentes usos como el riego agrícola y el abastecimiento de agua para la ciudad de Guadalajara como para proveer al ecosistema del agua necesaria en cantidad y calidad para el sustento de la biodiversidad de las especies acuáticas y terrestres.

Dado que la calidad del agua del río no es estática y que este algoritmo se basa en datos históricos y métodos estadísticos multivariados, cabe mencionar que el algoritmo se ha diseñado con la capacidad de generar un programa basado en herramientas de programación de lenguajes abiertos para incorporar nuevos datos del monitoreo y actualizar automáticamente el método de evaluación, incluyendo la selección de parámetros, el desarrollo de las curvas de calificación y el establecimiento de los pesos específicos de cada parámetro. De esta forma cuando se dan de alta los nuevos datos de monitoreo el algoritmo automáticamente genera el nuevo valor el ICA-RS y genera las curvas de tendencia.

Como estrategia para comunicar el estado y la evolución del ICA-RS, se recomienda la creación de una interfase amigable para presentar los resultados en diferentes niveles de desagregación mostrando: (i) el cálculo del ICA-RS a nivel cuenca y para cada una de las estaciones de monitoreo, (ii) cada uno de los indicadores individuales, así como su agregación para obtener el valor global del ICA-RS, (iii) los valores mensuales, anuales y la evolución histórica del ICA-RS. Se sugiere también desarrollar un menú interactivo para desplegar la información de forma intuitiva y generar una opción para ver en un video la explicación de la metodología de forma sencilla, de tal manera que el proceso sea abierto a la sociedad y comprendido por el público interesado.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

## 7 REFERENCIAS

- Abbasi, T.; Abbasi, S. A. (2012). 'Conventional' indices for determining fitness of waters for different uses. Chapter 3. In: *Water Quality Indices*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 25-62.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A. Tozer, R. G., (1970). Water quality index do we dare? *Water Sewage Works*, 117(10): 339-343.
- Brys, G., Hubert, M., Struyf, A. (2004). A robust measure of skewness. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 13, 996–1017. DOI: 10.1198/106186004X12632
- CEA Jalisco (2020). "Sistema de Calidad del Agua". Comisión Estatal del Agua. Secretaría de la Gestión Integral del Agua. Gobierno del Estado de Jalisco. México. Recuperado el 08 de mayo del 2020 de <http://info.ceajalisco.gob.mx/sca/>
- CGET (2020). "Índice de Calidad del Agua para que Revivamos el Río Santiago". Coordinación General Estratégica de Gestión del Territorio del Gobierno de Jalisco. México. Presentación 31 p.
- CONAGUA (2016). Monitoreo de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua. México. Recuperado el 21 de junio de 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo de calidad del agua en M xico 2012-2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo_de_calidad_del_agua_en_Mexico_2012-2015.pdf)
- CONAGUA (2018). "Diagnósticos de Calidad del Agua en Zonas Costeras". Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental. Gerencia de Calidad del Agua. Subdirección General Técnica. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México. Presentación 25 p. Recuperado el 09 de mayo del 2020 de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Calidaddelaguadecuerposuperficialesafuentesalazonascosteras.pdf>
- Contreras-Dávila, C. A., Juárez-Alcaraz, A., Contreras-Ramos, S.M., Davila-Vazquez, G., Del Real Olvera, J., Díaz Torres, J. J., Esquivel Solís, H., Hernández Mena, L., León Becerril, E., López López, A., Murillo Tovar, M. A., Villegas García, E., Gallardo-Valdez, J. (2013). *Análisis de la calidad del agua del Río Santiago dentro del Polígono de Fragilidad Ambiental en la cuenca El Ahogado*. Presented at Oral Session A2.1-Biological Processes IWA-Mexico 2013 Young Water Professionals, 24-26 April 2013 San Luis Potosí, Mexico C. A. Recuperado el 05 de julio del 2020 de [https://www.researchgate.net/publication/322641500 Analisis de la calidad del agua del Rio Santiago dentro del Poligono de Fragilidad Ambiental en la cuenca El Ahogado](https://www.researchgate.net/publication/322641500_Analisis_de_la_calidad_del_agua_del_Rio_Santiago_dentro_del_Poligono_de_Fragilidad_Ambiental_en_la_cuenca_El_Ahogado)

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

- Cude, C. G. (2001). Oregon water quality index a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1): 125-137. DOI:10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.
- Díaz Muñiz, C., García Nieto, P. J., Alonso Fernández, J. R., Martínez Torres, J., Taboada, J. (2012). Detection of outliers in water quality monitoring samples using functional data analysis in San Esteban estuary (northern Spain). *Science of The Total Environment*, 439, 54–61. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.083
- Dobbie, M. J., Dail, D. (2013). Environmental Indices. 2. Ecological Statistics. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vnn157>.
- Gradilla-Hernández, M.S., de Anda, J., García-González, A. et al. (2020). Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7>
- Grubbs, Frank E. (1950). Sample Criteria for Testing Outlying Observations. *Ann. Math. Statist.*, 21(1): 27-58. doi:10.1214/aoms/1177729885.
- Everitt B., Hothorn T. (2011) *An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R.*, New York, USA: Springer-Verlag, ISBN 978-1-4419-9649-7.
- Hallock, D. (2002). A water quality index for Ecology's stream monitoring program. Olympia: Washington State Department of Ecology. WA, USA. 23p. Recuperado el 21 de junio de 2020, de <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/documents/0203052.pdf>
- Heink, U., Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10, 584-593. doi:10.1016/j.ecolind.2009.09.009
- Hubert, M., Vandervieren, E. (2008). An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(12), 5168–5201. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2007.11.008>.
- iAgua (2020). “Indicadores de calidad del agua”. Recuperado el 09 de mayo de 2020 de <https://www.iagua.es/blogs/pedro-pablo-lone/indicadores-calidad-agua>
- Jolliffe, T. (2002). *Principal Component Analysis*. Second edition. New York: Springer-Verlag. 487p. <https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa501>
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., Bourrié, G. (2019). Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water*, 11(361): 1-26. doi:10.3390/w11020361

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

- Khalil, B., Ouarda, T. B. M. J., St-Hilaire, A., Chebana, F. (2010). A statistical approach for the rationalization of water quality indicators in surface water quality monitoring networks. *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.019>.
- Khalil, B., Ou, C., Proulx-McInnis, S., St-Hilaire, A., Zanicic, E. (2014). Statistical assessment of the surface water quality monitoring network in Saskatchewan. *Water, Air, & Soil, Pollution*, 225, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2128-1>.
- Landwehr, J. M., Deininger, R. A. Harkins, R. D. (1974). An objective Water Quality Index. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 46(7): 1804-1809. <https://www.jstor.org/stable/25038831>
- LFD, 2019. Ley Federal de Derechos. Diario Oficial de la Federación 09 de diciembre del 2019. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México. Recuperado el 08 de mayo del 2020 de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107\\_281219.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107_281219.pdf)
- Lumb, A., Sharma, T. C., Bibeault, J. F. (2011). A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. *Water Qual Expo Health*, 3,11-24. DOI 10.1007/s12403-011-0040-0.
- Olander, L. P., Johnston, R. J., Tallis, H., Kagan, J., Maguire, L. A., Polasky, S., Urban, D., Boyd, J., Wainger, L., Palmer, M. (2018). Benefit relevant indicators: Ecosystem services measures that link ecological and social outcomes. *Ecological Indicators*, 85, 1262-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.001>.
- QGIS.org (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Recuperado el 14 de mayo del 2020 de <http://qgis.org>
- Rai, R. K., Upadhyay, R. K., Ojha, A., Singh, V. P. (2012). The Yamuna River basin: Water resources and environment. Netherlands: Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9789400720008>.
- Rangeti, I., Dzwaairo, B., Barratt, G. J., y Otieno, F. A. O. (2015). Ecosystem-specific water quality indices. *African journal of aquatic science*, 40(3), 227-234. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341>
- RStudio (2020). RStudio. Recuperado el 14 de mayo del 2020 de <https://rstudio.com/>
- Robinson, R. B., Chris, C., & Odom, K. (2005). Identifying outliers in correlated water quality data. *Journal of Environmental Engineering*, 131(4) - April 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:4\(651\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:4(651))
- Rubin D. y Little R. (2002). *Statistical Analysis with Missing Data*. 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley, ISBN: 9780471183860.
- Saffran, K., Cash, K., Hallard, K. (2001). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life. CCME Water Quality Index 1.0. User's Manual. Environment Canada.

Documento disponible en: <http://riosantiago.jalisco.gob.mx/estrategia>

Guidelines and Standards Division. Canada. 5 p. Recuperado el 10 de mayo del 2020 de <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/138>

Said, A., Stevens, D. K., Sehlke, G. (2004). An innovative index for evaluating water quality in streams. *Environmental Management*, 34, 406-414. doi:10.1007/s00267-004-0210-y.

Samboni-Ruiz, N. E., Carvajal-Escobar, Y., Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3):172-181. Recuperado el 10 de mayo del 2020 de <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n3/v27n3a19.pdf>

Saunders, D., Margules, Ch., Hill, B. (1998). Environmental indicators for national state of the environment reporting biodiversity. State of the Environment [Environmental Indicator Report], Department of the Environment. Canberra, Australia. Recuperado el 10 de mayo del 2020 de [https://www.researchgate.net/profile/Denis\\_Saunders/publication/242575894\\_Australia\\_State\\_of\\_the\\_Environment\\_Environmental\\_Indicator\\_Report/links/53d20bde0cf2a7fbb2e9620c.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Denis_Saunders/publication/242575894_Australia_State_of_the_Environment_Environmental_Indicator_Report/links/53d20bde0cf2a7fbb2e9620c.pdf)

SEMARNAT (2019). "Indicadores de Calidad del Agua". Gerencia de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de México. Recuperado el 09 de mayo del 2020 de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AGUA05\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)

Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., Perera, J. C. (2016). Development of river water quality indices - a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(58):1-29. DOI 10.1007/s10661-015-5050-0.

Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., y Perera, B. J. C. (2018). Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecological indicators*, 85, 966-982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>

Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5 (2): 99-114. DOI: 10.2307/3001913. <https://www.jstor.org/stable/3001913>.

Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3): 34-38. Available online at <http://pubs.sciepub.com/ajwr/1/3/3> © Science and Education Publishing. DOI:10.12691/ajwr-1-3-3.



# Desarrollo de un índice de calidad del agua para el Río Santiago

Cuenca Río Santiago-Guadalajara



## **Autores:**

**Misael Sebastián Gradilla Hernández**

**Luis Fernando Casillas García**

**José de Anda Sánchez**

**Carlos Yebra Montes**



Agosto 2020

