

Tendencia de la calidad del agua en ríos de Tabasco, México

Ramos-Herrera, S., Broca-Martínez, L. F.¹, Laines-Canepa, J. R.¹,
Carrera-Velúeta, J. M.¹

Fecha de recepción: 5 de octubre de 2012 – Fecha de aceptación: 17 de diciembre de 2012

RESUMEN

Los estudios de tendencias en la calidad fisicoquímica del agua son una herramienta de apoyo para evaluar el efecto que a mediano o largo plazo tienen los programas de manejo del agua de superficie. El estudio se realizó con datos mensuales de siete parámetros fisicoquímicos medidos en 21 sitios de monitoreo en los ríos de Tabasco entre 1978 y 2011. Se determinó si presentaron tendencia espacial y temporal. Para estudiar la tendencia espacial el estado se dividió en cinco regiones y se estimaron diversos estadísticos por región. Mediante la prueba no estacional de Kendall se determinó la tendencia de las medianas anuales por parámetro fisicoquímico y se modeló utilizando modelos de suavización exponencial. La región Chontalpa se distinguió de las otras con respecto a la Demanda Química de Oxígeno y el Oxígeno Disuelto; su valor mediano fue 63.4 mg/L, mayor a lo que establece la NOM-001-ECOL-1996 (40 mg/L) y 3 mg/L, inferior a lo establecido en los criterios ecológicos de la calidad del agua CE-CCA-00/89 (5 mg/L), respectivamente. Las tendencias fueron, de aumento para la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días en la región de la Sierra y de los Ríos. La Demanda Química de Oxígeno tuvo tendencia a la disminución en la región Centro. Los Sólidos Suspendidos Totales tendieron a disminuir en Sierra y Centro. Las Grasas y Aceites disminuyeron en casi todas las regiones, excepto en Chontalpa.

Palabras clave: calidad del agua, tendencia, suavización exponencial, pronóstico, Mann-Kendall

Water quality trends in rivers of Tabasco, Mexico

ABSTRACT

Studies of trends in the physical-chemical quality of the water are a support tool to evaluate the effect that has surface water management programs in the middle or long term. The study was conducted with monthly data of seven physical-chemical parameters measured at 21 sites of monitoring in rivers in Tabasco between 1978 and 2011. It was determined if they presented spatial and temporal trend. To study the spatial trend, the State was divided into five regions and various statistical parameters were estimated by region. The trend of the annual medium by physical-chemical parameter was determined by non-seasonal Kendall test and was modeled using exponential smoothing models. The Chontalpa region is distinguished from each other with regard to the chemical demand of oxygen and dissolved oxygen; the median value was 63.4 mg/L, more than those established in the NOM-001-ECOL-1996 (40 mg/L) and 3 mg/L, less than the ecological criterion of the water quality CE-CCA-00/89 (5 mg/L), respectively. Trends were an increase of the biochemical oxygen demand at five days in the regions La Sierra and Los Ríos. The chemical oxygen demand was a declining trend in the region Centro. The total suspended solids have tended to decrease in the regions Sierra y Centro. Fats and oils declined in almost all regions, except in Chontalpa.

Keywords: water quality, trend, exponential smoothing, forecast, Mann-Kendall

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Correo electrónico: sergio.ramos@ujat.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2013. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 16, No.3, 2012, ISSN 1665-529-X.

Introducción

El agua de superficie es un recurso abundante en Tabasco, de hecho, constituye una fuente de abastecimiento convencional. El territorio tabasqueño administrativamente es parte de la cuenca del río Grijalva-Usumacinta, que además comprende el estado de Chiapas y pequeñas porciones del estado de Campeche. Este río tiene un escurrimiento natural medio superficial de 115 millones 536 mil m³ al año, una cuenca de 83 553 km² y destaca por su longitud, 1 521 km. La cuenca de este río pertenece a la región hidrológica administrativa XI Frontera Sur. Esta región tiene la mayor disponibilidad de agua dulce renovable (157 754 millones de m³ al año), la mayor precipitación pluvial anual normal (1 846.5 mm/año) y un grado de presión bajo (1.4 %) sobre este recurso. Sin embargo es una de las tres regiones que ha observado mayores rezagos de cobertura de agua potable y de alcantarillado (CONAGUA 2011). Para que este recurso satisfaga las demandas de la región es necesario cuidar su calidad, pues su uso está en función de esta.

Un problema que puede afectar la calidad del agua en la región es la descarga de grandes volúmenes de aguas residuales no tratadas, que pueden disminuir la capacidad de dilución y autodepuración. En la región, las fuentes comunes de contaminación abarcan las actividades agrícolas, la industria petrolera, los ingenios azucareros, las descargas domésticas e industriales sin tratamiento y otras fuentes difusas no cuantificadas. Se ha estimado que la cuenca del Grijalva-Usumacinta en promedio recibe alrededor de 185 921 kg/día de DBO₅ y 270 678 kg/día de SST que provienen de aguas municipales no tratadas. Por parte de la actividad industrial recibe 121 549 kg/día de DBO₅, 403 kg/día de DQO y 91 549 kg/día de SST (Toledo 2003). Estas descargas pueden incrementar los niveles naturales de DBO₅, DQO y SST de los cuerpos receptores por arriba de los límites aceptables y afectar la disponibilidad de este recurso en ciertas actividades. Además tienen un efecto en otros parámetros fisicoquímicos del agua, como el oxígeno disuelto, y su calidad bacteriológica. De hecho, un estudio de la calidad bacteriológica del agua en lagunas y ríos de la entidad determinó que los niveles de coliformes totales, fecales y *Vibrio cholerae* NO 01 están por arriba del límite permisible (70 NMP/100 ml, 14 NMP/100 ml y ausente, respectivamente) y que la posible causa es el vertido directo de aguas negras a los cuerpos de agua principalmente en zona rural (Borbolla et al. 2005).

En 2010, la red nacional de monitoreo de calidad del agua contaba con 1 627 sitios de monitoreo distribuidos a los largo del país en zonas con una alta

influencia antropogénica. La evaluación de la calidad del agua se ha hecho con base a tres indicadores principales: DBO₅, DQO y SST. Los límites máximos permisibles para estos parámetros son: 30, 40 y 150 mg/L, respectivamente con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Si los niveles en los cuerpos de agua naturales exceden estos valores el agua se considera entre contaminada y fuertemente contaminada. De acuerdo a los mapas de la calidad que presenta la CONAGUA, para el 2007 la calidad del agua en Tabasco fue aceptable con respecto a los SST, pero se observaron sitios donde está fuertemente contaminada con respecto a la DBO₅ y la DQO (CONAGUA 2008). En 2010 la calidad del agua fue aceptable y de buena calidad con respecto a la DBO₅ y los SST y se observaron sitios donde resultó contaminada con respecto a la DQO (CONAGUA 2011). Por otro lado, la evaluación de la calidad del agua a nivel estatal está a cargo del Laboratorio de la Calidad del Agua de la Secretaría de Recursos Naturales y Protección al Ambiente (SERNAPAM) del estado de Tabasco. En este caso la red de monitoreo está integrada por 21 sitios fijos de muestreo predefinidos desde 1978. Originalmente la frecuencia de muestro fue mensual, pero actualmente se hace bimestralmente. En consecuencia, ahora se cuenta con una base de datos histórica de diversos parámetros fisicoquímicos (DBO₅, DQO, SST, pH, Temperatura, Salinidad, etc.). Esto ha permitido principalmente comparar la calidad del agua con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 (SEDUE 1989) y con los niveles establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 2003); aunque esta norma estrictamente aplica para los vertidos de aguas residuales.

Uno de los objetivos del monitoreo a largo plazo es detectar patrones espaciales y cambios temporales de los parámetros de calidad del agua, es decir, detectar tendencias. Los análisis de tendencias ayudan a entender los cambios que experimenta una variable, espacial y/o temporalmente. El análisis de la tendencia espacial se conduce para detectar variación del parámetro de una localización a otra; mientras que el análisis de la tendencia temporal se realiza para detectar si el parámetro ha disminuido o aumentado dentro del periodo de estudio. Los métodos para estudiar las tendencias son variados. En algunos casos la tendencia espacial se ha estudiado comparando si el índice de calidad del agua varía entre sitios de muestreo; la tendencia temporal se ha estudiado mediante análisis de componentes principales (Guzman-Colis et al. 2011). También es común medir el coeficiente de correlación de Spearman y probar la hipótesis de que su valor es cero (sin tendencia) frente

a la alternativa de que es diferente de cero (existe tendencia) (Psilovikos *et al.* 2006). Otra prueba estadística común para detectar tendencias temporales es la prueba no estacional de Mann-Kendall. Esta prueba es útil para detectar tendencias monotónicas, pero requiere apoyarse en gráficos de dispersión y de cajas de las series de tiempo ya que no detecta inversiones en la tendencia. La ventaja de la prueba de Mann-Kendall es que puede desarrollarse aún con datos censurados o valores faltantes de la serie. Finalmente, para modelar dicha tendencia se han empleado modelos lineales, cuadráticos, y logarítmicos (Kauffman *et al.* 2010).

No se conocen estudios de tendencias de la calidad fisicoquímica del agua de los ríos de Tabasco y son importantes ya que ayudarían a planear estrategias de políticas públicas para una adecuada gestión de la calidad del agua. Dado que el estado se divide en cinco regiones naturales, que se destacan por sus actividades principales, sería relevante establecer cómo la calidad del agua varía entre ellas. Por tal motivo el objetivo del presente trabajo fue determinar la tendencia espacial y temporal de siete parámetros importantes de calidad del agua (DBO₅, DQO, SST, OD, pH, Grasas y Aceites (GyA) y Temperatura del agua (Ta)), en los ríos que conforman la cuenca del Grijalva-Usumacinta dentro del territorio de Tabasco y modelar dichas tendencias mediante modelos de suavización exponencial. De modo que tales determinaciones sean parte del fundamento para la

toma de decisiones en materia de gestión y control de la calidad del agua de los ríos de Tabasco.

Metodología

Para realizar este estudio se recopilamos los datos de siete de los principales parámetros que se miden en el agua: DBO₅, DQO, SST, OD, pH, GyA y T_{agua}; sobre una base mensual. Se involucraron 21 estaciones de la Red Estatal de Monitoreo de Calidad del Agua (REMCA), administrada por la SERNAPAM, en el periodo 1978-2011 (Figura 1). La información se concentró en una base de datos en electrónico. Para estudiar la tendencia espacial se distribuyeron las estaciones de acuerdo a las cinco regiones naturales en las que se divide Tabasco (Tabla 1), se calcularon sus medidas de tendencia central y de variación sobre una base anual respectivamente.

La prueba de tendencia se realizó con las medianas anuales de cada parámetro. Para ello se aplicó la prueba estadística no estacional de Mann-Kendall. La prueba consistió en medir el estadístico S, de acuerdo con la Ecuación 1.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \tag{1}$$

Dónde sgn es la función signo, definida en la Ecuación 2.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{2}$$

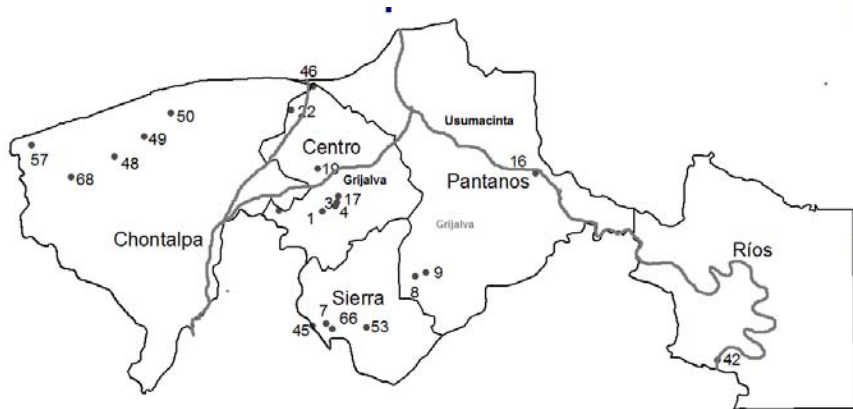


Figura 1. Distribución de las 21 estaciones de la Red Estatal de Monitoreo de Calidad del Agua en Tabasco

Tabla 1. Distribución de estaciones por regiones

Región	ID de Estaciones	Ríos dónde se localizan
Sierra	E7, E45, E53, E66	Teapa, Pichucalco, Tacotalpa y Puyacatengo
Centro	E1, E3, E4, E17, E18 E19, E22, E46	Mezcalapa, Grijalva, Usumacinta, Carrizal Samaria, Cuxcuchapa y González
Chontalpa	E48, E49, E50, E57 E68	San Felipe, Naranjeño, Santana, Chicozapote y Blasillo
Pantanos	E8, E9, E16	Puxcatán, Puxtatán y Río Usumacinta (en Jonuta)
Ríos	E42	Río Usumacinta (en Emiliano Zapata)

Para realizar la prueba de tendencia se estimó la varianza, $Var(S)$, con la Ecuación 3.

$$Var(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (3)$$

Finalmente, el estadístico de prueba, Z , se estimó de acuerdo al criterio establecido en la Ecuación 4.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{var(S)}} si S > 0 \\ 0 si S = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{var(S)}} si S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

La región de rechazo fue $|Z| > Z_{0.05/2} = 1.96$, con una significancia de 0.05; la hipótesis nula y alternativa correspondiente fueron: “el parámetro no presenta tendencia” frente a “existe tendencia”. El signo del estadístico S determinó si el parámetro aumento o disminuyó en el periodo de estudio (Gilbert 1987).

La tendencia temporal se modeló con el método de Holt de la suavización exponencial corregida. Este método se aplica a series temporales que manifiestan tendencia lineal, pero dónde tanto el nivel de la variable cómo su tasa de crecimiento cambian con el tiempo. La estimación del nivel de la variable de interés y su tasa de crecimiento al tiempo T , l_T y b_T , se realizaron con base a las Ecuaciones de suavización 5, 6 y 7 (Bowerman et al. 2007).

$$l_T = \alpha y_T + (1 - \alpha)(l_{T-1} + b_{T-1}) \quad (5)$$

$$b_T = \beta(l_T - l_{T-1}) + (1 - \beta)b_{T-1} \quad (6)$$

$$\hat{y}_{T+\tau}(T) = l_T + \tau b_T \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

Dónde α y β son parámetros de suavización que deben ser optimizados. Los modelos se ajustaron con datos del periodo 1978-2009 y se emplearon en el pronóstico de los valores en el periodo 2010-2011. Esto permitió estimar errores relativos porcentuales de los pronósticos.

Resultados

La Tabla 2, muestra la mediana, la media, el máximo, el mínimo y la desviación estándar de los siete parámetros fisicoquímicos analizados por regiones del estado. Dicha información puede servir como línea de base para la comparación de la calidad del agua entre estados. Usando como valores representativos de la región la mediana y la media, se observó que de los tres indicadores con los que la CONAGUA evalúa la calidad del agua, la DQO excedió el límite máximo permisible en la región Chontalpa. En general las cinco regiones tendieron a mantener niveles centrales de DBO_5 y SST por debajo de los límites permisibles; y aunque algunos valores mensuales los excedieron, el porcentaje no fue significativo.

La Tabla 3 muestra los resultados de la prueba no estacional de Mann-Kendall que se condujo a las series de tiempo de los valores medianos de los siete parámetros de calidad del agua. Los valores positivos de S indican una tendencia creciente y los negativos una decreciente. El valor entre paréntesis es el valor de Z calculado según la ecuación 4. De acuerdo a los resultados la DBO_5 se ha incrementado solo en dos regiones: La Sierra y los Ríos; en las otras, este parámetro se mantuvo sin cambios significativos. La DQO ha disminuido en la región Centro y se ha mantenido estable en las demás regiones. Los SST han disminuido tanto en la región Sierra como en la región Centro; en las regiones restantes este parámetro no observó ninguna tendencia. Solo en la región Centro el OD se ha incrementado; en las otras regiones se ha mantenido estable. El pH y la temperatura del agua se han mantenido estables en las cinco regiones del Estado. Las GyA se han mantenido estables en la región Chontalpa y han disminuido en las regiones restantes.

Tabla 2. Valores descriptivos de los siete parámetros fisicoquímicos estudiados

Región	Estadística	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	OD (mg/L)	pH	GyA (mg/L)	Tagua (C)
Centro	Mediana	3.0	20.0	44.0	6.0	7.7	5.0	28.0
Chontalpa		4.0	61.0	24.0	3.0	7.5	5.5	29.0
Pantanos		2.0	16.0	42.0	7.0	7.9	4.0	27.0
Ríos		2.0	12.0	42.0	7.3	7.9	5.0	27.0
Sierra		2.0	13.0	26.0	8.0	8.0	5.0	26.0
Centro	Media	5.2	28.4	72.4	5.2	7.6	10.4	27.7
Chontalpa		9.9	113.0	77.12	3.2	7.4	10.9	28.4
Pantanos		2.6	17.7	58.5	6.7	7.7	12.2	26.7
Ríos		1.9	18.8	63.6	7.4	7.8	12.8	26.8
Sierra		2.4	21.3	102.3	8.1	7.9	11.0	25.8
Centro	Máximo	390.0	407.0	1 922.0	12.0	9.1	451.0	39.0
Chontalpa		244.0	1 812.0	8276.0	16.8	9.0	297.0	37.0
Pantanos		36.0	138.0	1 000.0	15.0	9.1	470.0	37.0
Ríos		16.0	614.0	298.0	14.0	9.1	227.0	35.0
Sierra		26.0	778	1962.0	12.0	9.7	210.0	37.0
Centro	Mínimo	0.0	0.3	1.2	0.0	5.7	0.0	20.0
Chontalpa		0.0	2.4	1.0	0.0	5.8	0.0	18.0
Pantanos		0.0	0.0	1.0	1.0	6.0	0.0	8.5
Ríos		0.0	0.7	4.0	0.0	6.1	0.0	17.0
Sierra		0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	18.0
Centro	Desviación estándar	12.7	31.3	111.7	2.4	0.5	25.5	2.6
Chontalpa		17.5	179.7	466.8	2.8	0.6	22.1	2.8
Pantanos		2.9	14.23	67.1	1.5	0.5	40.1	2.5
Ríos		1.7	46.7	66.0	1.1	0.5	28.2	2.3
Sierra		2.3	45.9	231.1	1.2	0.5	22.7	2.5

Tabla 3. Resultados de la prueba de Mann-Kendall de tendencias

Parámetro	Sierra	Centro	Chontalpa	Ríos	Pantanos
DBO ₅	139 (2.68*)	-14 (-0.22)	28 (0.53)	121 (2.31*)	94 (1.87)
DQO	104 (1.94)	-161(-2.60*)	-56 (-1.03)	40 (0.69)	32 (0.58)
SST	-207 (-3.34*)	-137 (-2.21*)	-70 (-1.17)	-32 (-0.52)	80 (1.34)
OD	36 (0.63)	138 (2.29*)	-40 (-0.67)	65 (1.17)	80 (1.34)
pH	63 (1.01)	69 (1.11)	-72 (-1.16)	-7 (-0.10)	15 (0.24)
GyA	-257 (-4.20*)	-213 (-3.44*)	-116 (-1.87)	-234 (-4.16*)	-242 (-4.50*)
Temp	10 (0.14)	-24(-0.40)	-119 (-1.95)	22(0.40)	63 (1.12)

* Significativo estadísticamente al nivel 0.05 ($|Z_i| > 1.96$). Se rechaza la hipótesis nula

Tabla 4. Parámetros de los modelos de Holt ajustados

Parámetro	Región	α	l_0	b_0
DBO ₅	Sierra	0.0568	1.29	0.034
DBO ₅	Ríos	0.1975	1.44	-0.016
DQO	Centro	0.0409	22.07	-0.238
SST	Sierra	0.1095	62.00	-0.714
SST	Centro	0.2301	44.56	-0.353
OD	Centro	0.2691	5.97	0.0003
GyA	Sierra	0.5380	9.28	-0.054
GyA	Centro	0.6348	14.29	-0.556
GyA	Pantanos	0.3389	9.10	-0.122

La Tabla 4 muestra los parámetros de los modelos de Holt ajustados para modelar la tendencia solo de aquellos parámetros que de acuerdo a la prueba de Mann-Kendall presentaron tendencia. Las Figuras 2 a 10 muestran los modelos ajustados. El valor de β fue cero para todos los casos, excepto en el modelo de Holt de los SST de la Sierra, donde su valor fue 0.0052. l_0 y b_0 representan los estimados iniciales del nivel y la tasa de crecimiento en el periodo cero para iniciar el procedimiento con las ecuaciones de suavización. No fue posible estimar un modelo de tendencias aceptable para las GyA en la región de los Ríos. Adicionalmente los modelos se emplearon para pronosticar los valores medianos anuales 2010-2011. El modelo de Holt sobre estimó las medianas anuales 2010-2011 de DBO₅ observadas tanto en la región Sierra como la región de los Ríos (Figuras 2 y 3). El error relativo en el pronóstico fue de 50 % y 60 % en el caso de Sierra y mayor a 100 % en el caso de los Ríos.

El modelo de Holt para la DQO de la región Centro

subestimó ligeramente los valores observados 2010-2011; el error relativo estuvo entre 4 % y 6 % (Figura 4). Los modelos de Holt para los SST sobre estimaron los valores observados 2010-2011 en la región Sierra y Centro (Figuras 5 y 6). En la región Sierra el error relativo fue 33 % y 37 % respectivamente; y en la región Centro fue de 30 % y 18.5 % respectivamente. El modelo de Holt para el OD en Centro sobre estimó el valor observado en 2011 (Figura 7); su error relativo fue de 22 %. El modelo de Holt para GyA en la región Sierra pronosticó bastante bien los valores observados 2010-2011 (Figura 8); los errores relativos correspondientes fueron 0 % y 6.2 %.

El modelo de Holt sobre estimó las medianas anuales de GyA observadas en 2010-2011 en la región Centro (Figura 9); sus errores relativos fueron 37 % y 15 % respectivamente. Sin embargo en la región de Pantanos el modelo ajustado sub estimó dichos valores observados (Figura 10). Los errores relativos correspondientes fueron 38 % y 49 %.

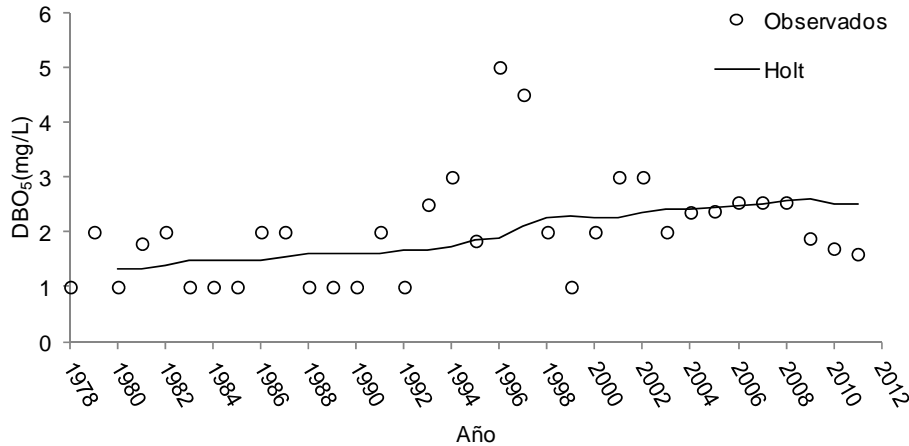


Figura 2. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de DBO₅ de la Sierra

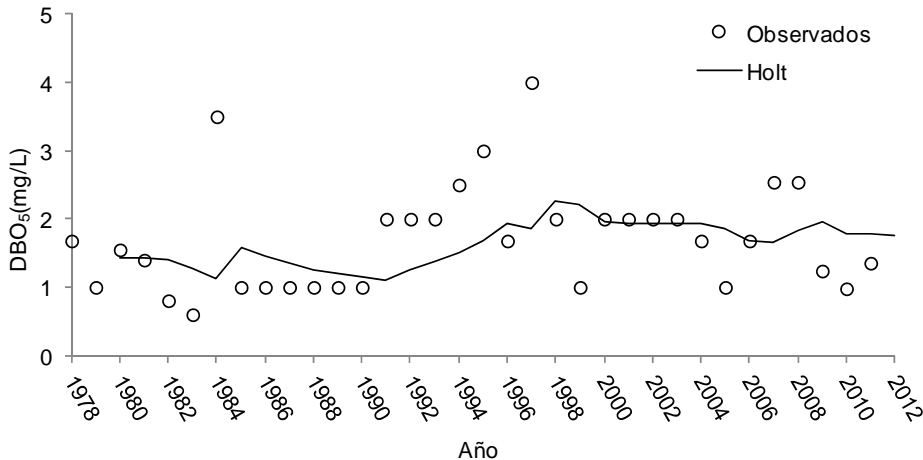


Figura 3. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de DBO₅ de los Ríos.

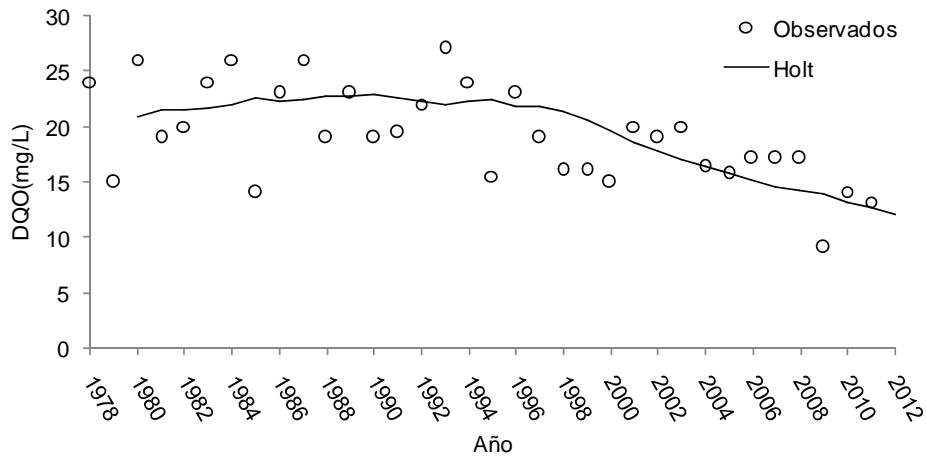


Figura 4. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de DQO región Centro

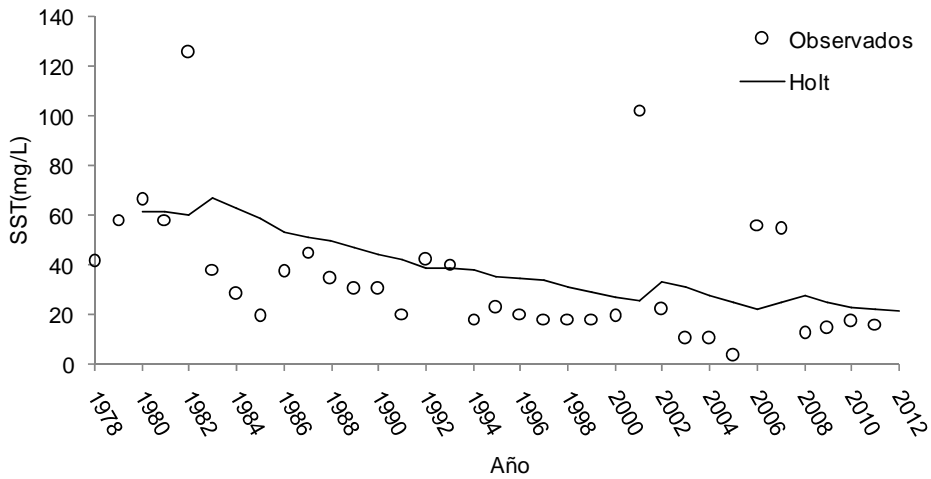


Figura 5. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de SST región Sierra

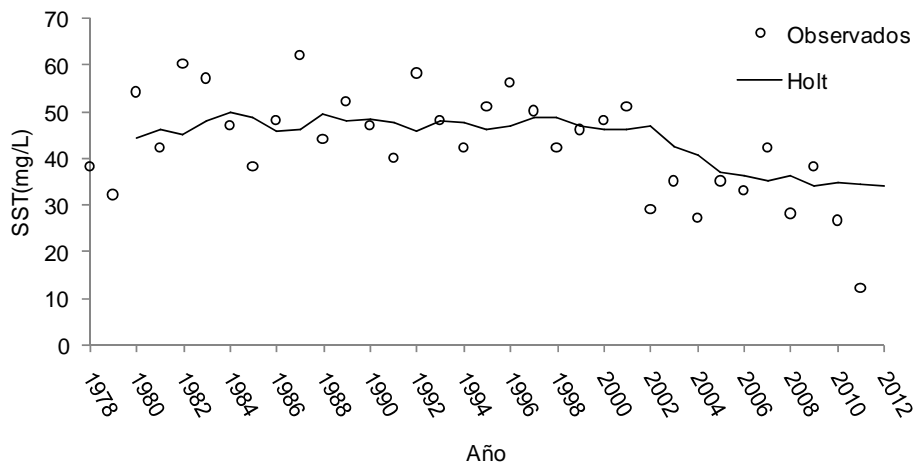


Figura 6. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de SST región Centro

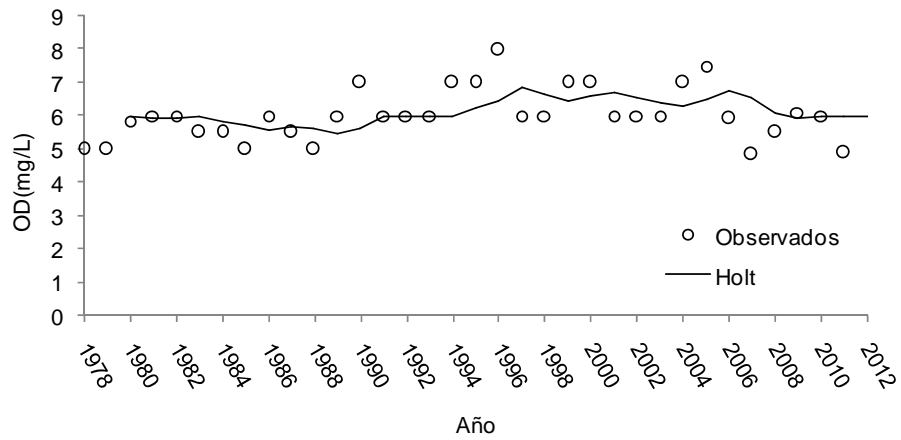


Figura 7. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de OD en la región Centro

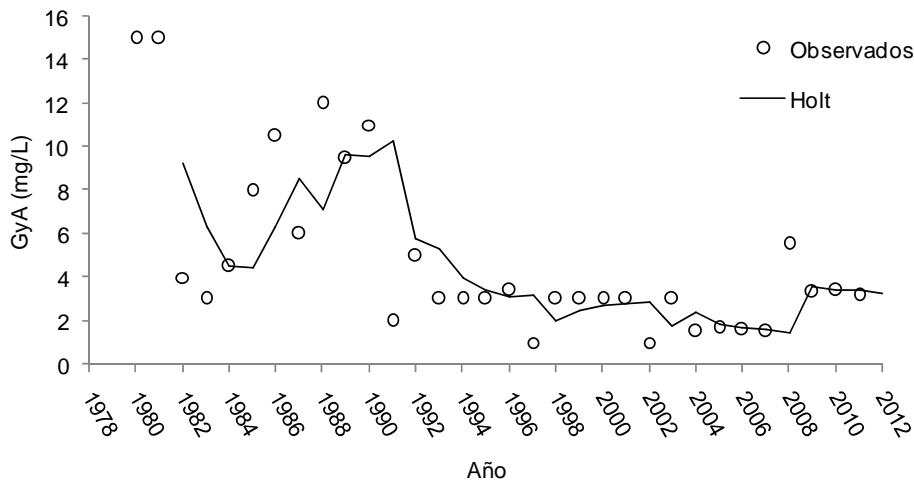


Figura 8. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de GyA región Sierra

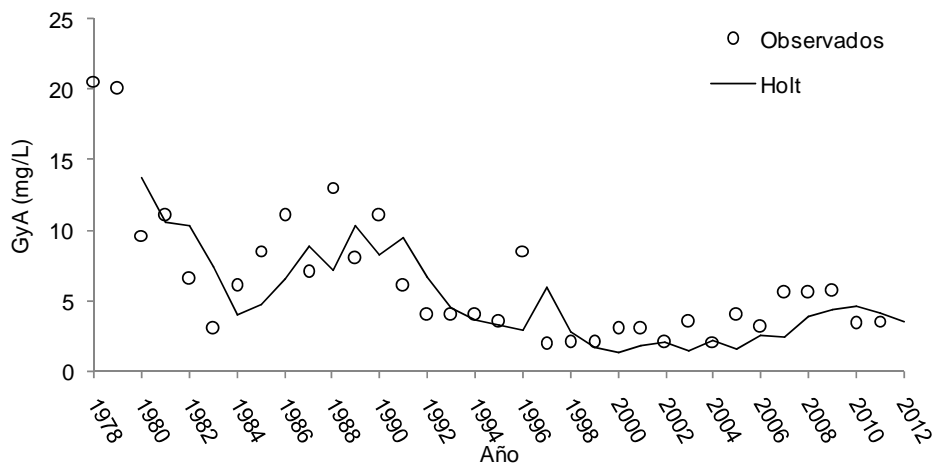


Figura 9. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de GyA región Centro

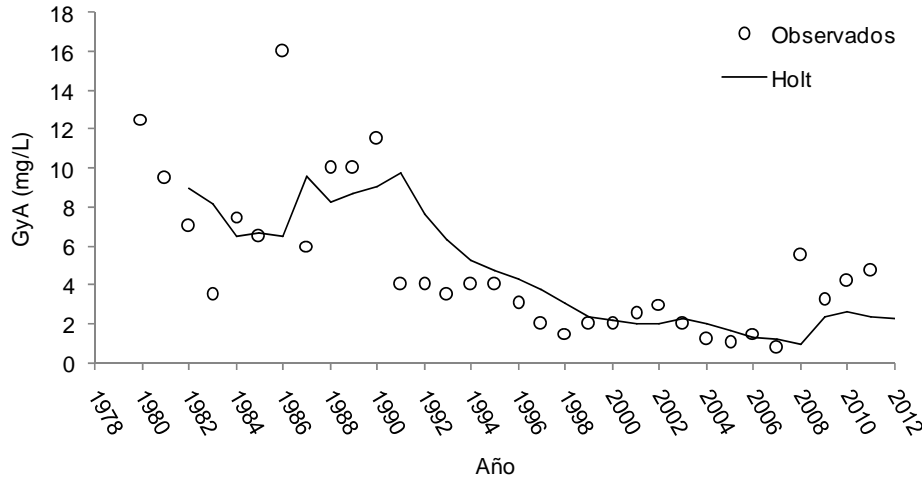


Figura 10. Modelo de pronóstico de Holt y valores observados de GyA región Pantanos

Discusión

Las medianas anuales de DQO excedieron el límite máximo permisible (40 mg/L) en la región de la Chontalpa. De hecho, alrededor del 66% de los valores mensuales analizados durante el periodo de estudio excedieron dicho valor; de modo que con relación a este parámetro las aguas de superficie de esta región se consideran contaminadas. Esto es preocupante, ya que la prueba de Mann-Kendall estableció que los niveles medianos de DQO en esta región se han mantenido estables o sin cambios aparentes dentro del periodo de análisis. La región de la Chontalpa comprende los municipios de Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán, Huimanguillo y Paraíso. Las actividades principales en estos municipios son la ganadería y la agricultura, y además concentra las principales zonas de explotación petrolera y los ingenios azucareros; estos últimos son un giro importante de aporte de DQO, SST y DBO₅. Chapman (1996) señala que las concentraciones de DQO que se han observado en aguas de superficie no contaminadas son del orden de 20 mg/L y superiores a 200 mg/L en aguas que reciben efluentes industriales. Aunque los valores mensuales medidos de DQO no superaron con frecuencia los 200 mg/L (en todo el periodo de estudio solo el 12 % de los registros lo excedió entre 1985 y 2006), lo cierto es que la DQO es un indicador de contaminación industrial que no ha presentado cambios, apuntando al hecho de que los esfuerzos por disminuir el impacto de las descargas de aguas residuales de tipo industrial a las corrientes naturales de la región Chontalpa no han sido suficientes o adecuados.

Los niveles centrales de DBO₅ quedaron por debajo del límite máximo permisible, 30 mg/L, para protección de vida acuática en las cinco regiones analizadas. En Chontalpa, solo el 8% de los registros

de este parámetro durante el periodo de estudio excedió este valor, en Centro solo el 2% y en las demás regiones menos del 1%. La DBO₅ indica la existencia de materia orgánica que proviene de la descarga de aguas municipales, entre otras. En zonas con poco o nulo asentamiento humano, este indicador alcanza valores bajos en comparación con las zonas donde si existe asentamiento (Muñoz-Nava *et al.* 2012). En Tabasco la cobertura de agua potable es relativamente baja (CONAGUA 2011) por lo que es común la descarga de aguas municipales crudas a las corrientes de superficie naturales. Por lo tanto una razón para que se observen bajos niveles de DBO₅ puede ser la capacidad de dilución de los ríos y más en época de lluvias donde se alcanzan los caudales máximos, pues la química del agua (y por lo tanto su calidad) está fuertemente relacionada con los regímenes de flujo de la corriente (Klavins *et al.* 2001; Antonopoulos *et al.* 2001). En este estudio la información correspondiente a los caudales de las corrientes y/o el inventario de descargas de aguas residuales no estuvo disponible para establecer una relación entre la calidad del agua y dichas variables.

Los niveles de OD compatibles con el sostenimiento de la vida acuática deben ser mayores a 5 mg/L. Sin embargo, la región de la Chontalpa se caracterizó por tener el 69% de sus registros por debajo de este valor. Después de Chontalpa, la región del Centro obtuvo el 33% de sus niveles mensuales por debajo del valor límite; en las otras regiones este porcentaje fue significativamente bajo (< 10 %). Puesto que los niveles de DQO son altos en Chontalpa, es de esperarse que los de OD sean bajos, pues se sabe que niveles altos de DQO o DBO₅ inciden en valores bajos de OD (CONAGUA 2011). El contenido de oxígeno de las aguas naturales también varía con la temperatura del agua, la salinidad, el grado de

turbulencia, la actividad fotosintética y la presión atmosférica. De hecho, la solubilidad del OD disminuye conforme aumenta la temperatura del agua e incrementa la salinidad de esta (Chapman 1996). Ya que en Chontalpa la temperatura promedio es de 29 °C, el límite teórico promedio esperado de OD en esta zona se estima en 7.7 mg/L, sin corregir por salinidad. De modo que la región de la Chontalpa presenta un déficit de oxígeno de 4.7 mg/L, con base a su valor mediano de 3 mg/L. En el caso de Centro puede notarse que mientras observa una tendencia hacia la disminución en la DQO, presenta una tendencia al aumento en la OD (Tabla 3) estableciendo claramente la relación inversa entre la DQO y el OD antes mencionada.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece un rango aceptable del pH entre 5 y 10 unidades. Chapman (1996) señala que en muchos cuerpos naturales de superficie, este parámetro oscila entre 6 y 8.5 unidades. Los valores mensuales de pH recopilados en este estudio, caen en el rango de 5.7 a 9.7 unidades. Por otro lado, con base a los niveles centrales que caracterizaron cada región (Tabla 2), las aguas de superficie de la entidad se clasifican como alcalinas (pH >7). El pH no presentó tendencia temporal significativa, según la prueba de Mann-Kendall; ni tampoco tendencia a diferir entre las regiones; esto se comprobó adicionalmente mediante gráficos de cajas. El pH es un parámetro importante pues se relaciona de modo cercano con la productividad biológica del sistema y puede ser afectado por la actividad antropogénica: descargas de aguas no municipales, escorrentías agrícolas y deposición atmosférica de sustancias que forman ácidos.

Es común que la tendencia temporal de los

Reconocimientos

Este trabajo fue financiado por el CONACYT según convenio de investigación TAB-2008-C13-93770. Dentro del proyecto “Estrategia de Consolidación para la Red de Información Analítica Ambiental del Estado de Tabasco”.

Referencias

- Antonopoulos V.Z., Papamichail D.M., Mitsiou K.A. (2001). Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. “Hydrology and Earth System Sciences”, 5(4), 679-691.
- Borbolla S.M.E., Vidal P. M.R., Piña G. O.E., Cruz Q. I.B., Vidal V. J.J. (2005). Características sanitarias del agua de Tabasco 2003. “Salud en Tabasco”, 11(3), 375-379.
- Bowerman B.L., O’connel R.T., Koehler A.B. (2007). “Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado”, CENGAGE Learning. México.
- Chapman D. (1996). “Water Quality Assessments: A Guide to the use of biota, sediments and water. Environmental monitoring”, 2th ed., UNESCO, WHO, and UNEP, E&FN Spon, London UK.

parámetros fisicoquímicos se modele mediante modelos lineales y cuadráticos, modelos logarítmicos y exponenciales (Psilovikos *et al.* 2006; Antonopoulos *et al.* 2001). En este estudio la tendencia se modelo mediante modelos de suavización exponencial ya que estos modelos catalogan a las observaciones recientes con más peso que las observaciones remotas, de modo que pueden ser apropiadas para hacer pronósticos de la tendencia. De los modelos ajustados, el de la DQO de la región Centro, y el de GyA de la región Sierra presentaron bajo error relativo en los pronósticos de la tendencia 2010-2011, en los demás, el error relativo fue alto. Sin embargo es importante mencionarse que no se espera que la tendencia y el valor observado sean exactos pues una serie de tiempo puede presentar otros componentes (ciclos, variación estacional y fluctuaciones irregulares); que requieren incluirse en el modelo siempre que sea posible. Finalmente, los dos modelos ajustados, antes mencionados pronosticaron para el 2012 niveles medianos anuales de DQO y GyA en Centro y Sierra de 11.6 mg/L y 3.3 mg/L respectivamente.

Conclusiones

De las cinco regiones estudiadas, solo en la región Chontalpa los niveles representativos de la DQO exceden el límite máximo permisible (40 mg/L) y consecuentemente sus niveles de OD se encuentran por debajo del valor guía, 5 mg/L. De los siete parámetros analizados solo el pH y la temperatura del agua se mantienen sin cambios significativos en sus niveles. La DBO₅ está aumentando en la región Sierra y Chontalpa; la DQO está disminuyendo en la región Centro; los SST están disminuyendo en las regiones Sierra y Centro. El OD está aumentando en la región Centro; mientras que las GyA disminuyen en todas las regiones excepto la Chontalpa.

- CONAGUA (2008). “Estadísticas del agua en México. Edición 2008”, SEMARNAT, México D.F.
- CONAGUA (2011). “Atlas del agua en México 2011”, SEMARNAT, México D.F.
- Gilbert R.O. (1987). “Statistical methods for environmental pollution monitoring”, John Wiley & Sons. Canada.
- Guzman-Colis G., Thalasso F., Ramírez-López E., Rodríguez-Narciso S., Guerrero-Barrera A., Avelar-González F. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. “Revista Internacional de Contaminación Ambiental”, 27 (2), 89-102.
- Klavins M., Rodinov V., Kokorite I., Klavina I., Apsite E. (2001). Long-term and seasonal changes in chemical composition of surface waters in Latvia. “Environmental Monitoring and Assessment”, 66(3), 233–251.
- Kauffman J.G., Homsey R.A., Belden C.A., Rittler S.J. (2010). Water quality trends in the Delaware River Basin (USA) from 1980 to 2005. “Environmental Monitoring and Assessment”, 177(1-4), 192-225.
- Muñoz-Nava H., Suárez-Sánchez J., Vera-Reyes A., Orozco-Flores S., Battle-Sales J., Ortiz-Zamora A.J., Mendolia-Argüelles J. (2012). Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. “Revista Internacional de Contaminación Ambiental”, 28(1), 27-38.
- Psilovikos A., Margoni S., Psilovikos A. (2006). Simulation trend analysis of the water quality monitoring daily data in nestos river delta. Contribution to the sustainable management and results for the years 2000-2002. “Environmental Monitoring and Assessment”, 116(1-3), 543-562.
- SEDUE (1989). CE-CCA-001/89 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación 13 de diciembre de 1989.
- SEMARNAT (2003). NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México.
- Toledo A. (2003). “Ríos, costas y mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México”, INE-SEMARNAT, México.