

Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y Predicción

(Con 9 Figuras y 1 Tabla)

Water quality in the basin of the Amajac river, Hidalgo, Mexico: Diagnosis and prediction

(With 9 Figures & 1 Table)

Amado Alvarez¹⁻² Jesús, Enrique Rubiños Panta¹, Francisco Gavi Reyes¹,
Juan José Alarcón Cabañero², Elizabeth Hernández Acosta³,
Carlos Ramírez Ayala¹, Enrique Mejía Saenz¹, Francisco Pedrero Salcedo²,
Emilio Nicolas Nicolas², Enrique Salazar Sosa⁴

Resumen. Se desarrolló el índice de calidad del agua como método estandarizado para comparar la categoría de manera integral, entre localidades y a través del tiempo, de los distintos almacenamientos de agua, ríos y arroyos de la cuenca del Amajac. Además, se puede predecir el grado de contaminación y establecer estrategias de planeación en el manejo de los recursos hídricos para la cuenca en cuestión. La metodología utilizada se basó en la expresión cuantitativa de calidad del agua. Se hicieron tres muestreos (2005-2006) y se determinó: Oxígeno disuelto, Coliformes Fecales, pH, Demanda bioquímica de oxígeno, Nitratos, Fósforo total, Turbidez y Sólidos Totales Disueltos. Para predecir la calidad integral del agua (ICA), se hizo un análisis de regresión múltiple entre el ICA y los ocho parámetros analizados. Posteriormente, para cada variable, se identificaron los patrones de comportamiento y se consignaron los modelos matemáticos. Los resultados obtenidos indican que la calidad del agua para uso urbano, agua de bebida, piscícola, y agrícola fue de Calidad Media (ICA = 50-69), en el 29% de los sitios muestreados dentro de la cuenca hidrológica del Río Amajac. Al mismo tiempo, el 59% de las localidades fue de Mala Calidad (ICA = 30-49). Por último el 12% de los sitios se encontró altamente contaminado (ICA < 30). El mejor ajuste de los parámetros analizados se obtuvo con los modelos cuadráticos y cúbicos.

Palabras clave: clasificación integral del agua, cuenca hidrológica, modelos matemáticos.

Abstract. A water quality index as a standardized method to compare the category

¹ Colegio de Postgraduados de Montecillo, Carretera México –Texcoco, km 36.5, Texcoco 56230, Estado de México. jesusaa@colpos.mx

² CEBAS-CSIC. Apdo. 164, 30100 Espinardo, Murcia, España

³ UACH. Área de Recursos Naturales. Chapingo, Texcoco, Estado de México

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango

Se agradece al CONACYT y al Gobierno del Estado de Hidalgo, por el apoyo económico brindado para la realización del presente estudio.

Recibido 27.VII.2005: aceptado 28.VI.2006

in an integral way, between locations and through time, of the different water, river and stream storages of the Amajac river basin was developed. In addition, it is possible to predict the degree of contamination and establish planning strategies in the management of the water resources for the river basin in issue. The used methodology was based in the quantitative expression of water quality. Three samplings were made (2005-2006) and Dissolved Oxygen, Coliform in faeces, pH, Oxygen Biochemical Demand, Nitrates, Total Phosphorus, Turbidity and Dissolved Total Solids were determined. To predict integral water quality (IWQ), a multiple regression analysis between IWQ and the eight parameters was made. Later on, behavior patterns were identified and mathematical models were developed for each variable. Results indicate that water quality for urban, the drinking water, fishtank and agricultural uses was of medium quality (WQI= 50-69) in 29% of the sampling sites within the hydrologic basin of the Amajac River. At the same time, 59% of the locations were of bad quality (IWQ = 30-49). Finally, 12% of the sites were highly contaminated (IWQ < 30). The best fit for the analyzed parameters was obtained with the cubic models.

Key words: integral water classification, hydrologic river basin, mathematical models

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua (ICA), es un término ampliamente usado. Sin embargo, la cuantificación científica resulta importante y esta es una estrategia básica en el desarrollo de las bases científicas para el manejo de los recursos hídricos, (Hakanson et al., 2000). El término del manejo óptimo de los recursos requiere estándares predefinidos de calidad integral de agua, como componente de los criterios de optimización (Straskraba y Gnauck, 1985).

El valle del Amajac se localiza en el Estado de Hidalgo, México, entre los paralelos 20°00' hasta los 21°15', y los meridianos 98°00' a los 99°30'; abarca una superficie de 6.903,74 km²; la forma de la cuenca es del tipo de hoja alargada; su corriente principal es de 4° orden; la densidad de drenaje es de 0,1616 km de cauce por km²; la densidad de corriente es de 0,013 cauces por km², y la longitud del flujo superficial es de 302,76 km. Las entradas anuales de agua dentro del área de la región aportadas por la precipitación son de alrededor de 6.710,15 millones de m³, mientras que la precipitación media anual es de 971,96 mm. La producción de agua generada por la cuenca se estimó en el orden de los 1,625 Mm³. (López et al., 2006).

Antecedentes. De esta zona se han reportado algunos trabajos sobre la calidad del agua, como los de Hernández et al. (2006), donde se indica que las aguas del Río Tulancingo, dentro del fundo legal de la ciudad de Tulancingo, están muy contaminadas. Se han informado valores por encima de la norma de sólidos solubles, sólidos totales, oxígeno disuelto y coliformes fecales y totales.

La comisión nacional del agua, CNA (2000-2003) del Río Amajac, en el Municipio de Atotonilco el Grande, determinó 32 características del agua, consignando valores por encima de la norma en los parámetros turbiedad, coliformes totales, y sólidos totales. Al mismo tiempo, los valores de oxígeno disuelto en mayo del 2000 (2,84 mg l⁻¹), indican problemas de contaminación.

En cuanto a las regiones hidrológicas administrativas, la que tiene mayores problemas de contaminación del agua es el Valle de México. Este tiene un 70% de sus cuerpos de agua altamente contaminados. Después figura la Península de Baja California con un 27%. La región

Noroeste es la que presenta el agua de mejor calidad, con el 88% de sus cuerpos de agua en la categoría de aceptable. Los cuerpos de agua de las demás regiones están en la categoría de poco contaminadas (SEMARNAT, 2002). Al comparar los valores de ICA del año 2001 con los obtenidos en 1989, se observa que las regiones del Noroeste y Balsas mejoraron sensiblemente su calidad del agua. Por su parte, las regiones del Río Bravo, Cuencas Centrales, Pacífico Sur, Golfo Centro, Frontera Sur y Valle de México mostraron un mayor deterioro en la calidad de sus aguas.

Khan et al. (2004) indicaron que la aplicación del índice de calidad del agua fue avalada por el Consulado Canadiense como la medida ambiental es herramienta práctica para mostrar los resultados de manera integral de los parámetros: físicos, químicos, orgánicos y microbiológicos de las diferentes comunidades. ShioyMey et al., (2004) evaluaron el índice de calidad del agua, en el Río Keya, Taiwán, midiendo 13 variables dentro de tres aspectos: Orgánicos, partículas y microorganismos. Estos autores concluyeron que la aplicación de este nuevo índice provee más información para la evaluación de la calidad integral del agua que la se usaba anteriormente en Taiwán. GuoQiang et al. (2004), valoraron el índice de calidad del agua en el río afluente del lago Erha, Yunnan, China. Sus resultados indicaron que la calidad del agua mostró un tremendo deterioro de 1971 a 1999. La fuente de contaminación provino de las descargas industriales y municipales. Cude (2001) consignó que el índice de calidad del agua de Oregon, es un número simple que expresa la calidad del agua por la integración de ocho variables, con el objeto de mostrar un método simple y consistente para expresar de calidad ambiental del agua.

Curcio y Comic (2002), formularon un criterio utilizando ecuaciones simples para estimar la calidad del agua. Estos autores usaron cinco parámetros microbiológicos sobre el reservorio del Gruza, Yugoslavia. Tomazoni et al. (2003), sobre el Río Paraná, Brazil, reportaron que el agua de los afluentes: El Anta Gorda, Brinco y Jirau, fue considerada de buena calidad y podía ser usada para abastecimiento público después de tratamientos convencionales. Estos autores utilizando el índice de calidad del agua y los valores promedio de: coliformes fecales, pH, turbidez, sólidos disueltos totales, temperatura, dióxido de carbono, nitratos, alcalinidad y materia orgánica en sus estudios.

Problemática. Aún cuando existen muchas investigaciones reportadas sobre el índice de calidad del agua, no se han efectuado trabajos sobre el tema en la cuenca del Amajac. Las evaluaciones existentes de la calidad del agua son muy localizadas. Además, no consideran los estudios de una manera integral, es decir evaluando los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, conjuntamente y de una forma sistematizada. De esta manera, se pueden hacer comparaciones generales entre localidades y a través del tiempo, por lo que resulta de gran importancia obtener información general de toda la cuenca en cuestión.

OBJETIVO

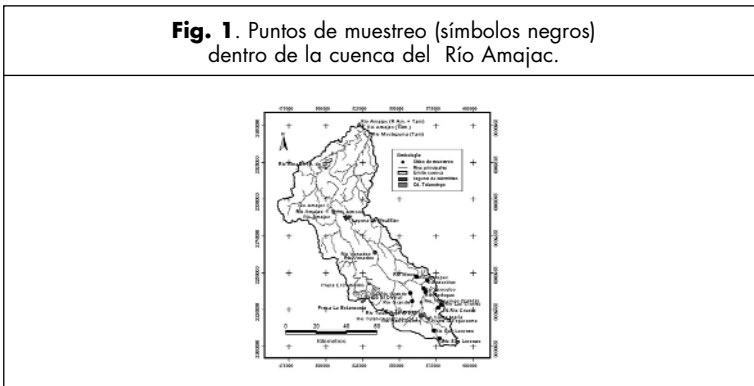
El objetivo de esta investigación fue registrar el Índice de calidad del agua de una manera integral en los distintos almacenamientos de agua, ríos y arroyos de la cuenca del Amajac y poder predecir su grado de contaminación a fin de establecer estrategias que permitan planificar el manejo de los recursos hídricos.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Área de estudio. El estudio se inició con recorridos de campo, tomando como base planos en escala 1: 50,000 (INEGI-1992). Durante los años 2005-2006, se seleccionaron 17 sitios representativos mediante el empleo de un Geoposicionador portátil (GPS), se registró la altitud, latitud y longitud de cada punto dentro de la cuenca hidrológica; su ubicación se muestra en la Fig. 1.

Metodología y Parámetros considerados. Se cuantificó la calidad del agua, siguiendo a Brown et al. (1970), Ott (1978) y Smith (1990). Se hicieron tres muestreos (Septiembre y Noviembre del 2005, y Enero del 2006) en cada uno de los 17 sitios se determinaron: a) Turbidez (NTU), utilizando un turbidímetro (Termo, AQ4500); b) pH, con un potenciómetro multifuncional (Hanna Instruments pH/CE/TDS/T meter); c) Oxígeno Disuelto (% saturación), con el aparato Hanna Instruments (HI 9145); d) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5); e) Bacterias Coliformes Fecales (BCF); f) Nitrógeno (NO₃); g) Fósforo total (Pt); y h) Sólidos totales disueltos (STD) en el laboratorio, de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Secretaría de Economía, 1996).

Fig. 1. Puntos de muestreo (símbolos negros) dentro de la cuenca del Río Amajac.



Análisis de datos y bases para la predicción de la calidad integral del agua.

Para predecir la calidad integral del agua, considerando todos los usos potenciales, se tomó como base el ICA obtenido. Se ordenaron los sitios de acuerdo al grado de contaminación del agua y se hizo un análisis de regresión múltiple entre el ICA vs. Los ocho parámetros de la calidad del agua medidos. Posteriormente se hicieron los diagramas de dispersión de cada una de las variables estudiadas y su relación con el ICA, se identificaron los patrones de comportamiento y se obtuvieron los modelos matemáticos. Estos últimos, permiten efectuar predicciones sobre el avance del grado de contaminación de una manera rápida, segura, sencilla, en diferentes tiempos y a un bajo costo. Los modelos son de la forma:

$$\text{Cuadrática: } Y = ,0 + ,1 * X + ,2 * X^2 + \hat{A}$$

$$\text{Cúbica: } Y = ,0 + ,1 * X + ,2 * X^2 + ,3 * X^3 + \hat{A}$$

Donde:

Y = Índice de Calidad del Agua (ICA).

X = Concentración del: NO₃, P-total, OD, DBO, SDT, pH, Turbidez, o BCF

,0 = Ordenada en el origen

,1 = Pendiente

,2 = Coeficiente del efecto cuadrático

,3 = Coeficiente del efecto cúbico

\hat{A} = error aleatorio

El análisis de regresión múltiple, además de los modelos cuadráticos, cúbicos y las estadísticas descriptivas entre el ICA respecto de los parámetros descriptos se efectuaron con el paquete estadístico SAS (SAS, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico del Índice de calidad integral del agua en la cuenca del Amajac.

Los resultados obtenidos (Cuadro 1) indicaron que la calidad del agua para todos los usos potenciales se clasificó como de calidad media (ICA = 50-68) en el 29% de los sitios muestreados. Según el uso al que se destine, de acuerdo con la SEMARNAT (2002), se puede calificar en: a) requiere de tratamiento mayor para usarse en el abastecimiento público, como es el caso de presa La Estanzuela, en la ciudad de Pachuca, Hidalgo; b) es aceptable, más no recomendable para uso recreativo, como en el caso de la presa el Cedral, cercana a la capital del Estado de Hidalgo; c) puede afectar especies sensibles de vida acuática, ej. la Presa el Comalillo, en el municipio de Atotonilco el Grande; d) no requiere tratamiento para uso agrícola o industrial. El agua se usa en el valle del Río Venados, para producción de cultivos agrícolas, y e) no tiene problemas para uso con fines de navegación, práctica que se desarrolla en la Laguna de Meztlán.

El 59% de los cuerpos de agua están en la categoría de contaminados dentro del intervalo de ICA = 30 a 49, valores con los que el líquido solo podría tener uso industrial o agrícola con tratamiento. Esta es la situación para la presa La Esperanza de la Ciudad de Tulancingo y la Laguna de Meztlán. Por último el 12 % de los cuerpos de agua medidos están altamente contaminados (ICA, menor a 30). Esto los vuelve prácticamente inaceptables para cualquier uso, aunque se utilizan alrededor de 250 a 500 l seg-1 en la producción agrícola del Distrito de Desarrollo Rural (D.D.R.) de Tulancingo, Hidalgo.

Dentro de los parámetros que más influyen en la contaminación de acuerdo con los resultados del análisis estadístico de regresión múltiple están el Oxígeno Disuelto (0%) y los Coliformes Fecales (de 12.200 hasta 24.000 NMP 100 ml⁻¹), ambos con un coeficiente de determinación altamente significativo ($r^2 = 0.68^{***}$) (Gráficos 1 y 2). Estos resultados fueron obtenidos en el Río Tulancingo, dentro del área de la ciudad. Esta fuerte contaminación se debe a que el agua residual de tipo urbana es vertida al río sin ningún tratamiento previo, y de acuerdo con el censo de población INEGI (2005), en esta zona existía una población total de 505.263 habitantes distribuidos en 1.388 localidades.

Tabla 1. Concentración media de los parámetros estudiados e índice de calidad del agua (ICA) en sitios de la cuenca del río Amajac. Ciclos 2005-2006. Cada valor es el promedio de n=3

Localidad	BCF (NMP/ 100 ml)	O.D. % sat	pH	Turbidez NTU	SDT mg l ⁻¹	DBO mg l ⁻¹	NO ₃ mg l ⁻¹	Protal mg l ⁻¹	ICA
Presa Comalillo	3810	101.5	7.72	9.04	7.72	11.30	2.72	0.22	65
Presa La Estanzuela	110	115.2	7.58	6.03	7.58	13.77	2.16	0.88	64
Presa El Cedral	1630	106.9	7.29	7.85	7.29	12.97	1.54	1.23	59
San Juan Amajac-2	11920	99.5	7.80	78.57	7.80	12.77	6.65	0.29	54
Río venados	9560	95.8	7.61	44.85	7.61	12.45	3.05	6.08	51
Boca de León	9300	100.1	7.99	34.20	7.99	15.84	5.52	1.47	49
Río Amajac Tamanz	11070	97.6	8.00	19.59	8.00	14.40	8.42	2.30	49
Río Almolon	16700	99.0	7.69	74.77	7.69	17.52	2.85	13.59	48
Río Amajac + Moctez	17530	93.6	8.11	25.43	8.11	18.81	3.81	3.64	48
Río Moctezuma Tam	16120	99.2	8.35	16.67	8.35	13.01	6.12	3.08	48
Presa La Esperanza	19670	108.2	6.93	7.52	6.93	16.78	19.67	1.94	48
San Juan Amajac 1	8950	101.5	7.82	76.33	7.82	20.34	7.17	4.53	45
Río Amajac (S. J. A.)	12070	98.0	7.68	88.67	7.68	17.23	7.40	10.25	44
Laguna Meztiilan	16010	61.7	7.37	53.93	7.37	15.27	9.00	6.87	41
Río Tulancingo (Cd)	19670	0.0	7.11	16.50	7.11	16.21	10.35	0.40	36
Río Tulancingo (D.D.R.)	24000	0.0	6.84	25.57	6.84	16.10	10.64	2.38	29
Río Tulancingo (Salida)	12200	0.0	6.81	32.00	6.81	18.91	12.03	2.44	28

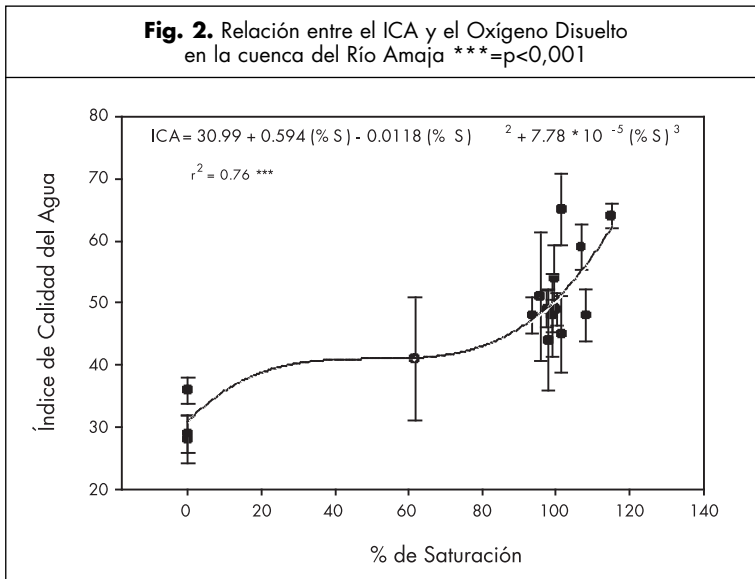
Como se puede observar en dos distintos parámetros medidos el mejor ajuste de la dispersión de los datos no corresponde a modelos lineales (Figs. 2-9).

En un trabajo similar, Kaushik et al. (2002) midieron el grado de calidad del agua para uso residencial, industrial, comercial y agrícola en dos ciudades bien desarrolladas, Hisar y Panipan, Haryana, India, considerando 13 variables. Estos autores reportaron que El ICA en Panipan fue menor de 50, mientras que en las áreas de Hisar, la magnitud de contaminación varió de 50 a 100.

Predicción de la calidad integral del agua

Relación entre el ICA y el Oxígeno Disuelto. El oxígeno disuelto es un gas muy relevante en dinámica de aguas. Su solubilidad es función de varios factores: temperatura, presión, coeficiente de solubilidad, tensión de vapor, salinidad y composición fisicoquímica del agua. Además, el porcentaje de saturación del oxígeno en agua depende de la turbulencia y de la superficie de contacto entre el gas y el agua (Marín, 2003).

Para la relación entre el oxígeno disuelto, medido como porcentaje de saturación, y el Índice de calidad integral del agua los resultados obtenidos fluctuaron desde 0 hasta 115 % de saturación. La distribución de los puntos se ajustó a un modelo cúbico, altamente significativo, con una pendiente de 0.594 para el efecto lineal, de -0.0118 en el cuadrático y 0.0000778 para el efecto cúbico (Fig. 2). En el caso de los valores de oxígeno disuelto más altos (La Estanzuela = 115.2 %, El Cedral = 106.9 %, y Comalillo = 101.5 %), el agua se aprovecha para todos los usos incluyendo el agrícola.

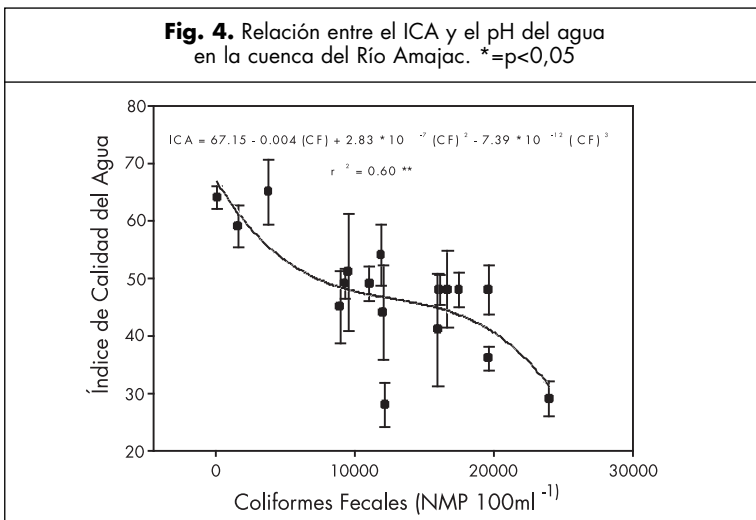
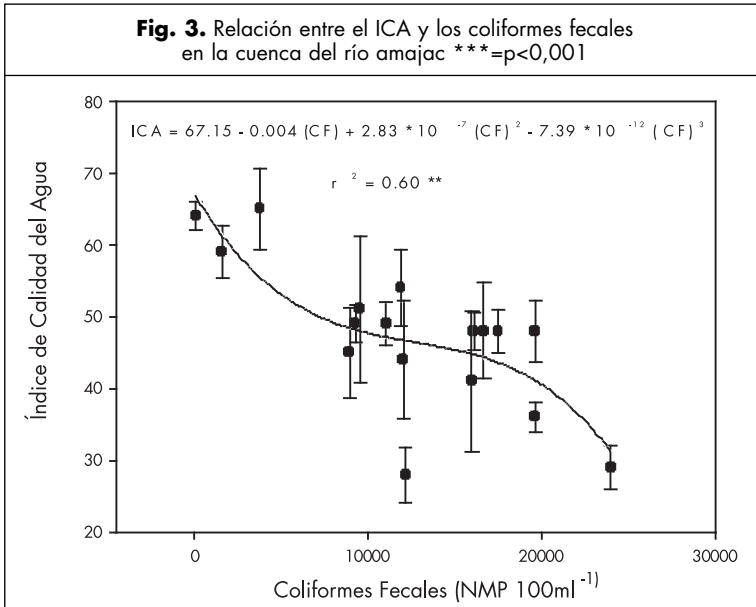


Relación entre el ICA y los Coliformes Fecales. Los gérmenes patógenos habitualmente transmitidos por el agua viven en los intestinos del hombre y de los animales de sangre caliente (agentes de la fiebre tifoidea, del cólera, etc.). La manifestación de una contaminación fecal constituye una excelente señal de alarma (Campos et al., 2000). Los coliformes fecales influyen directamente en la contaminación del agua. En la región todavía no existen sistemas de depuración: los vertidos de aguas urbanas al río se unen a las aguas residuales de los distintos tipos de ganadería.

En el presente trabajo se obtuvo un modelo cúbico altamente significativo en la relación ICA-Coliformes fecales, con una pendiente de -0.004 en el plano lineal, $2.83 \cdot 10^{-7}$ en el cuadrático y $-7.39 \cdot 10^{-12}$ en el cúbico (Fig. 3). La relación fue inversamente proporcional entre la calidad integral del agua y los coliformes fecales. Los valores más altos de coliformes fecales se registraron en el río Tulancingo, dentro del área urbana de la ciudad del mismo nombre.

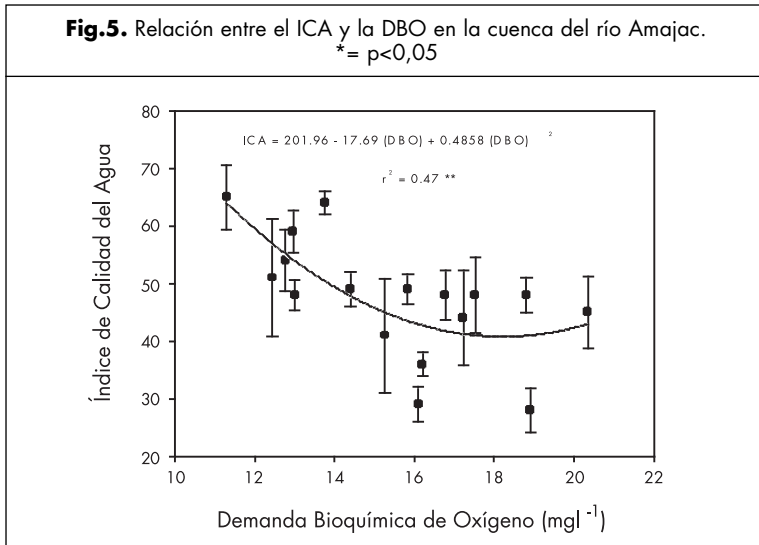
Relación entre el ICA y el pH. El pH del agua se debe sobre todo al equilibrio carbónico y a la actividad vital de los microorganismos acuáticos. La secuencia de equilibrios de disolución de CO_2 en el agua, y la subsiguiente disolución de carbonatos e insolubilización de bicarbonatos, alteran drásticamente el pH de cualquier agua. Asimismo, la respiración de los organismos heterótrofos en el agua produce dióxido de carbono modificando el pH del medio acuático, (Seoanez, 1999). En la cuenca del Amajac, la contaminación del agua aumenta cuando el pH disminuye. La respuesta se asocia a un modelo cúbico dentro de un rango de pH de 6.5 a 8.5 (Fig. 4).

Khan et al. (2003), informaron que el pH y la concentración de sulfatos y nitratos mostraron un mejor ajuste con modelos cuadráticos que con los modelos lineales.



Ajuste entre el ICA y la demanda bioquímica de oxígeno. Soon y Seok, (2002), reportaron que la DBO, es un indicador del contenido de la materia orgánica, la cual incluye sólidos que provienen del reino animal o vegetal, o de actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Estos pueden incluir proteínas, hidratos de carbono, lípidos, agentes tensioactivos, pesticidas y productos químicos de uso agrícola.

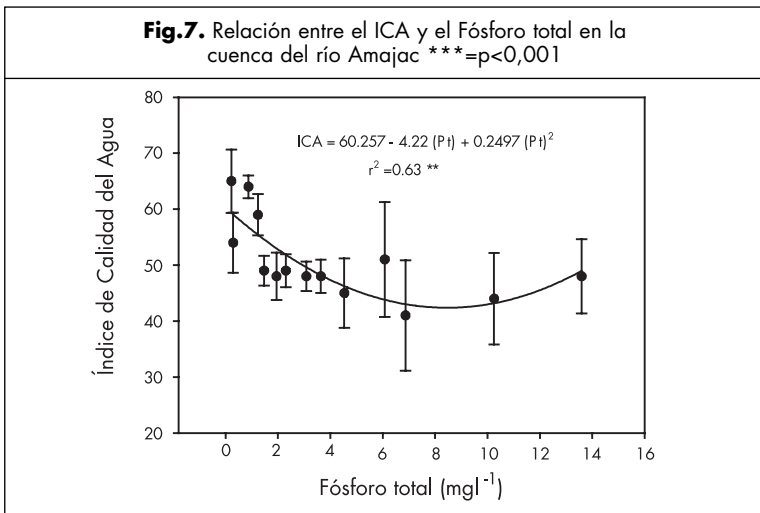
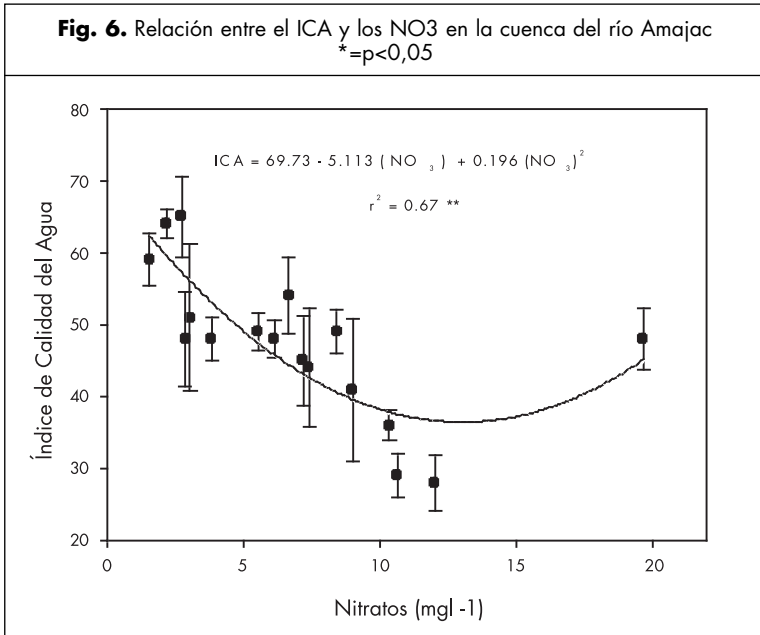
La DBO indica la cantidad de oxígeno necesaria para destruir, estabilizar o degradar la materia orgánica presente en una muestra de agua por la acción bacteriológica (Soon y Seok, 2002). Los resultados obtenidos para la cuenca del Amajac se ajustaron a un modelo cuadrático con pendiente negativa en el plano cuadrático y un coeficiente de determinación significativo (Fig. 5). La tendencia general fue que la calidad del agua es mejor cuando la DBO es menor.



Relación entre el ICA y los Nitratos. El uso de fertilizantes naturales y artificiales en las zonas agrícolas y los efluentes de granjas animales provocan la aparición de nitratos en las aguas superficiales. Los valores más altos obtenidos fueron de $19,67 \text{ mg l}^{-1}$. Los mismos corresponden a la presa la Esperanza, la cual se caracteriza por tener una gran abundancia de lirio acuático. Esto contribuye a una reducción de la calidad del agua. Brentrup et al. (2004), definieron la eutroficación como un incremento indeseable en la producción de biomasa acuática, causada por altas cantidades de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo que entran en los cuerpos de agua.

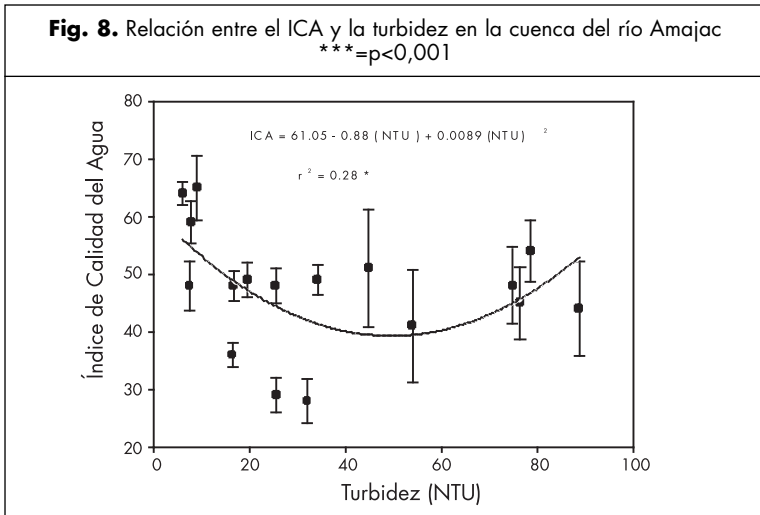
La relación entre los nitratos y el ICA, del presente estudio, resultó en un modelo cuadrático, con un coeficiente de determinación altamente significativo (Fig. 6).

Relación entre el ICA y el Fósforo total. La respuesta encontrada para el fósforo se ajustó a un modelo cuadrático (Fig. 7), donde el 50% de las muestras fueron equivalentes a un ICA=50. El fósforo de un agua puede proceder de: a) disolución de rocas y minerales que lo contienen, b) lavado de suelos en los que se encuentra como resto de actividades ganaderas o agrícolas, c) aguas residuales domésticas vertidas a las aguas naturales (Marín, 2003). Dentro de esta última fuente de contaminación, podemos incluir los detergentes utilizados en limpieza doméstica. Estos explican el 50% del fósforo presente en aguas contaminadas por vertidos urbanos. Estas fuentes pueden aplicarse a las condiciones de la Cuenca del Amajac.

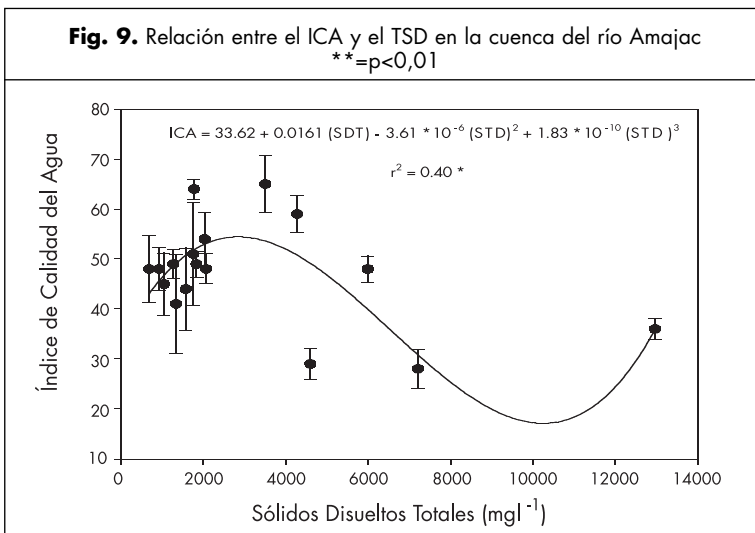


Relación entre el ICA y la Turbidez. Los resultados obtenidos se ajustan a un modelo de segundo orden (Fig. 8). En el rango intermedio de ICA obtenido, el agua es de mala calidad. En la presa la Esperanza los valores corresponden a 7.52 NTU, debido a la presencia de organismos biológicos como el lirio acuático. En San Juan Amajac los valores llegan a 76.33 NTU; el agua, de color verde, acusa problemas de sales provenientes del agua que vierten las grutas de Tulantongo, y tiene una clasificación C3 de acuerdo a Ayers y Westcott (1985).

La presencia de diversas materias en suspensión, arena, limo, coloides orgánicos, plancton y otros organismos microscópicos da lugar a la turbidez del agua. (American Public Health Association / American Water Works Association / Water Pollution Control Federation, 1989).



Relación entre el ICA y los Sólidos Disueltos Totales. La respuesta se ajustó a un modelo cúbico donde el coeficiente de determinación resultó altamente significativo (Fig. 9). La pendiente más sobresaliente es negativa sobre el plano cuadrático, $(-3.61 * 10^{-6})$; la tendencia general es que la menor concentración de sólidos disueltos totales corresponden a aguas de mejor calidad. Trabajos similares han sido desarrollados por Nagels et al. (2001).



CONCLUSIONES

Se desarrolló el índice de calidad del agua como método estandarizado para poder comparar la categoría del agua de manera integral entre localidades y a través del tiempo en los distintos almacenamientos de agua, ríos y arroyos de la cuenca del Amajac. Los resultados contribuyen a predecir el grado de contaminación y establecer estrategias de planeamiento en el manejo de los recursos hídricos.

La calidad del agua para abastecimiento público, uso recreativo, vida acuática, uso agrícola, industrial, o con fines de navegación se clasificó como de calidad media (ICA = 50-69) en el 29 % de los sitios muestreados. El 59 % de los cuerpos de agua estuvieron en la categoría de contaminados dentro del intervalo ICA de 30 a 49, valores con los que el líquido sólo podría tener uso industrial o agrícola con tratamiento. Por último, el 12% de los cuerpos de agua medidos estuvieron altamente contaminados (ICA menor a 30); ésto los vuelve prácticamente inaceptables para cualquier uso. Sin embargo, se utilizan de 250 l seg-1 en la producción agrícola en el Distrito de Desarrollo Rural de Tulancingo, Estado de Hidalgo.

El mayor grado de predicción de la calidad integral del agua usando los parámetros se ajustó a modelos cuadráticos y cúbicos. Los componentes que más influencia tuvieron en la contaminación del agua fueron el oxígeno disuelto y los coliformes fecales.

REFERENCIAS

- American Public Health Association/ American water works Association/ water pollution control federation, Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th edition. Washington, D.C. (1989) 2-12.
- Ayers RS, DW Westcott, Water Quality for Agriculture, Food and Agricultural Organisation of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage, paper 29, Rome, Italy (1985).
- Brentrup F, J Kusters, H Kuhlmann, J Lammel, Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. I. Theoretical concept of a ICA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy* 20 (2004) 247.
- Brown PM, NI McClelland, RA Designer, RG Tozer, A water quality index-do we dare? *Water & Sewage* (1970) 339.
- CNA.2000-2003. Resultados de análisis de agua del Río Amajac, en el Municipio de Atotonilco el Grande. Laboratorio de calidad del agua, Área de saneamiento y calidad del agua, Subgerencia de ingeniería, Gerencia Estatal en Hidalgo. Pachuca, Hidalgo.
- Cude CG, Oregon Water Quality Index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association* 37 (2001) 125.
- Curcio S, L Comic, A microbiological index in estimation of surface water quality. *Hydrobiologia*, 489 (2002) 219.
- GuoQiang Z, Y XingXiu, J Nan, H LongHua, The cause for change of water quality of Erhai Lake and prediction of water quality. *Journal of Northeast Forestry University* 32 (2004) 99.
- Hakanson L, A Parparov, A Ostapenia, VV Boullion, KD Hambright, Development of a system of water quality as a tool for management. Final report to INTAS, Uppsala university, Department of Earth Science (2000) 19.
- Hernández AE, E Rubiños-P, J Amado-A, C Ramírez-A, F Gavi-Reyes, Contaminación del agua en el río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. En: Gallardo JF (Ed). (2006) 335-341. Medioambiente en iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los albores del Siglo XXI. Tomo I, Badajoz, España.
- INEGI (1992). Cartas Topográficas, escala 1:50.000. En Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo, Aguascalientes, Ags.
- INEGI (2005). XIII Censo General de Población y Vivienda. Aguascalientes, Ags. México.
- Kaushik A, K Kumar, L Kanchan, S Taruna, HR Sharma, Water quality index and suitability assessment of urban ground water of Hisar and Panipat in Haryana. *Journal of Environmental Biology* 23 (2002) 325.
- Khan AA, R Paterson, H Khan, Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canada* 39 (2004) 258.

- Khan F, T Husain, A Lumb, Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic Region of Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* 88 (2003) 221.
- López I, MJ Chávez-M, JE Rubiños-P, R Martínez-E, LA Ibáñez-C, A Exebio-G, Balance hidrológico de la subcuenca del río Amajac, afluente del pánuco, en el estado de Hidalgo. Tesis profesional. Chapingo, México (2006).
- Marín-G R, Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos tratamiento y control de calidad de aguas. Editorial Díaz de Santos. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España (2003).
- Nagels JW, RC Davies, DG Smith, A water quality index for contact recreation in New Zealand. *Water Science and Technology* 43 (2001) 285.
- Ott W, Water quality index: a survey of indexes used in the United States. *Environmental Monitoring Series*. EPA -600/4-78-005, (1978) 128.
- SAS Institute Inc. Release 8.02. SAS Institute Inc. Cary NC 27513, USA (2001).
- Secretaría de Economía, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales. NOM-001-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de 1997. México (1996) 15.
- SEMARNAT, Agua. Calidad del Agua. Informe de la situación del medio ambiente en México. Complejo de Estadísticas ambientales (2005) 129-154. Boulevard Adolfo Ruiz Cortínez, No 4209. Jardines de la Montaña, CP 14210. Tlalpan, México DF.
- Seóanez-C M, Aguas residuales urbanas. Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento. Segunda Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España (1999) 50.
- ShiowMey L, L ShangLien, W ShanHsien, A generalised water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 96 (2004) 35.
- Smith DG, A better water quality indexing system for rivers and stream. *Water Research* 24 (1990) 1237.
- Soon PS, Y Seok -L, A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling* 152 (2002) 65.
- Straskraba M, AH Gnauck, Freshwater Ecosystems. Modelling and Simulation. Development in Environmental Modelling, 8. Elsevier (1985) 373.
- Tomazoni JC, VL Bittencourt-A, R Filho, EF da Mantovani-L, Water quality of the basin of the rivers Anta Gorda, Brinco and Jirau- Southeast of the State of Paraná Brazil. *Sanare* 20 (2003) 28.