

MODELO PREDICTIVO DEL COMPORTAMIENTO DE NUTRIENTES EN UN CULTIVO MIXTO DE ALGAS CHLOROPHYTA

Predictive Model of Nutrient Behavior in a Mixed Cultivation of Chlorophyta Algae

Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Dr. en Cambio Climático y Sostenibilidad

Correspondencia al autor: aguilarfelix2013@gmail.com

Recibido: 08 de julio 2017 | Revisado: 21 de agosto 2017 | Aprobado: 28 de agosto 2017

Asesorado por: Dr. en Ciencias Técnicas Agropecuarias **Tomás Antonio Padilla Cámara** tpadillacambara@hotmail.com

Resumen

Los procesos de fitorremediación utilizando algas clorofitas en aguas residuales han sido ampliamente impulsados en el período de 2006 al 2017, sin embargo, no se tienen modelos que permitan establecer el comportamiento de reducción de nutrientes que pueden alcanzar.

En el presente estudio, utilizando un diseño experimental factorial fraccionado, con pruebas de ANOVA multivariable, se determina un modelo del comportamiento de reducción de fosfato al propiciar el desarrollo natural de un cultivo mixto de algas clorofitas en el agua residual del efluente de un filtro percolador (tratamiento aerobio), obteniendo un modelo que explica en un 96.85 % el comportamiento de fosfato, dando como resultado una remoción del 31 % de su concentración inicial.

El estudio muestra la necesidad de continuar los procesos de investigación, que permitan desarrollar criterios técnicos para el diseño de fotobiorreactores, para reducir las concentraciones de nutrientes de las plantas de tratamiento de agua residual municipal.

Palabras clave

Agua residual, eutrofización, fitorremediación, fosfato, nutrientes.

Abstract

The phytoremediation using mixed cultures of Chlorophyta algae in wastewater have been widely promoted since 2006 to 2017, however, there are no models that allow establishing the reduction behavior of nutrients that can be achieved.

In the present paper, using a fractional factorial experimental study, with multivariable ANOVA tests, a model of the phosphate reduction behavior was determined by promoting the natural development of a mixed cultures of Chlorophyta algae in the wastewater of the effluent of a trickling filter (aerobic treatment), obtaining a model that explains in 96.85 % the behavior of phosphate, resulting in a removal of 31 % of its initial concentration.

The study shows the need to continue the research processes, which allow the development of technical criteria for the design of photobioreactors, to reduce the nutrient concentrations of the municipal wastewater treatment plants.

Keywords

Residual water, eutrophication, phytoremediation, phosphate, nutrients.

Introducción

Las algas clorofitas según lo expresa Ruiz Martínez (2011), son organismos que deben su color a la clorofila tipo a y b, siendo la especie más frecuentemente encontrada en aguas residuales de origen doméstico, las del orden de las volvocales (organismos de agua dulce provistos de flagelos) y las clorococales (microorganismos desprovistos de flagelos) (pág. 12).

Algunas especies de algas clorofitas se han investigado dentro del concepto de fitorremediación de agua residual, siendo estas: “la *Chlorella* sp., *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris*, y *Scenedesmus*, las cuales se han producido en cultivos individuales, mixtos e inmovilizados” (Sriram y Seenivasan, 2012, pág. 10).

El desarrollo de cultivos de algas clorofitas representa “una fuente potencial del empleo de la biomasa obtenida como alimento, extracción de compuestos químicos y pigmentos” (Salazar González, 2009, pág. 18).

La aplicación de la fitorremediación en aguas residuales no es un concepto nuevo, ya que se han realizado diversos estudios en países como: Estados Unidos, España, Alemania, India, Inglaterra, Egipto y Corea del Sur, y a nivel de América Latina, en México, Colombia y Venezuela.

Estos estudios han tenido resultados bastante alentadores en cuanto al nivel de absorción de nutrientes, habiéndose identificado que “las algas clorofitas tienen una capacidad muy buena de absorción de nitrógeno y fósforo” (Sriram y Seenivasan, 2012, pág. 10); sin embargo, estos estudios no pueden ser conclusivos, dado que se han realizado en condiciones controladas de crecimiento y realizando la inoculación de cepas de algas previamente adaptadas a aguas residuales artificiales.

Por lo anterior, aún no se tiene información relevante que permita establecer la factibilidad de alcanzar niveles de remoción de nutrientes aceptables en cultivos que se desarrollen en forma natural en aguas residuales no artificiales, y cómo las concen-

traciones de nutrientes iniciales pudieran afectar la eficiencia de estos procesos de fitorremediación.

El presente artículo documenta la propuesta de un modelo del comportamiento de los nutrientes en un cultivo mixto de algas clorofitas desarrolladas de forma natural en el efluente del filtro percolador de una planta de tratamiento de agua residual, resaltando que estos procesos de fitorremediación pueden ser utilizados para mitigar los efectos de eutrofización de los cuerpos de agua que reciben los efluentes de estas plantas de tratamiento de agua residual.

Desarrollo del estudio

El estudio se realiza con un enfoque cuantitativo correlacional, midiendo el efecto que sobre las variables dependientes (nutrientes en el afluente) tienen las variables independientes (nutrientes en el influente) a través de procedimientos estadísticos multivariados.

El punto de partida de este estudio es la caracterización del fitoplancton realizado por Guerra Quemé, Zea Cano y Aguilar (2015), en el efluente de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), en el que establecen que se pueden desarrollar de forma natural algas *Chlorella* de forma mayoritaria.

Con base en este resultado, se desarrolla un estudio experimental factorial fraccionado, con pruebas de ANOVA multivariable, con el objetivo de establecer el nivel de correlación entre las concentraciones iniciales de nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fosfato sobre el nivel de absorción de estas concentraciones al aplicar procesos de fitorremediación de nutrientes en el efluente de las estaciones depuradoras con filtros percoladores.

Para aplicar el estudio experimental factorial fraccionado, se realiza una revisión de la caracterización de nutrientes que se ha realizado en diversos estudios en la planta de tratamiento de agua residual de la USAC, con el objetivo de establecer el valor máximo y mínimo de las concentraciones de nutrientes en el cual debe desarrollarse el estudio

experimental factorial fraccionado, obteniéndose en este proceso de análisis los datos mostrados en la tabla siguiente.

Tabla I. *Factores experimentales considerados en el diseño del experimento.*

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Mínimo	Máximo
A: Nitrógeno amoniacal inicial	mg/l	Continuo	Controlable	0.78	13.57
B: Fosfato inicial	mg/l	Continuo	Controlable	19.0	204.0
C: Nitrato inicial	mg/l	Continuo	Controlable	76.0	116.0
D: Nitrito inicial	mg/l	Continuo	Controlable	0.1	1.55

Fuente: monitoreo de calidad de agua realizado por Argueta, Blandón y Aguilar (2016, pág. 61).

Para determinar el efecto de las concentraciones iniciales sobre el nivel de absorción de los cultivos mixtos de algas *Chlorella* generadas de forma natural en aguas residuales provenientes de la salida de filtros percoladores, se plantea un diseño experimental factorial 24 resolución V+ (estima todos los efectos principales e interacciones dobles).

El diseño experimental propuesto es del tipo multifactorial en el cual se plantean dos factores (variables independientes a manipular), siendo estos factores:

- a) Concentración de fosfato inicial.
- b) Concentración de nitrógeno inicial.

El factor 1 se trabaja con dos niveles:

Nivel 1: fosfato con valor máximo

Nivel 2: fosfato con valor mínimo

El factor 2, se trabaja con seis niveles, según se indica a continuación:

Nivel 1: nitrito con valor máximo

Nivel 2: nitrito con valor mínimo

Nivel 3: nitrato con valor máximo

Nivel 4: nitrato con valor mínimo

Nivel 5: nitrógeno amoniacal con valor máximo

Nivel 6: nitrógeno amoniacal con valor mínimo

El agrupamiento de estos factores, deriva en 16 tratamientos, realizándose para cada uno de ellos con tres réplicas, lo que representa 48 muestras utilizadas para el desarrollo del modelo.

Es importante indicar que para el desarrollo del estudio se utilizan las 48 muestras obtenidas por Argueta, Blandón y Aguilar (2016), quienes modifican las concentraciones iniciales de las muestras para que estas alcancen los valores máximos, utilizando “di fosfato mono sódico, cloruro de amonio, nitrato de potasio y nitrito de sodio” (pág. 41), según las concentraciones iniciales indicadas en las tablas II, III y IV.

Tabla II. *Valores de los tratamientos utilizados para el desarrollo del modelo, resultados de la réplica uno.*

Tratamiento	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-
	Inicial	Inicial	Inicial	Inicial	Final	Final	Final	Final
1	0.78	19.00	76.00	1.55	0.74	7.08	36.19	0.05
2	13.57	19.00	76.00	1.55	6.93	7.08	99.52	0.16
3	0.78	204.00	76.00	1.55	1.81	87.04	45.24	0.96
4	13.57	204.00	76.00	1.55	28.86	150.35	57.30	0.58
5	0.78	19.00	116.00	1.55	0.74	9.26	88.78	1.07
6	13.57	19.00	116.00	1.55	6.93	7.08	65.10	0.11
7	0.78	204.00	116.00	1.55	1.59	158.26	50.31	1.49
8	13.57	204.00	116.00	1.55	8.08	164.59	34.03	0.00
9	0.78	19.00	76.00	0.10	0.30	5.12	57.30	2.14
10	13.57	19.00	76.00	0.10	9.81	8.17	72.38	0.59
11	0.78	204.00	76.00	0.10	1.18	133.73	45.24	1.82
12	13.57	204.00	76.00	0.10	8.66	145.60	63.33	1.36
13	0.78	19.00	116.00	0.10	0.07	5.44	59.18	2.73
14	13.57	19.00	116.00	0.10	5.77	41.38	47.35	0.64
15	0.78	204.00	116.00	0.10	1.40	192.29	32.55	6.27
16	13.57	204.00	116.00	0.10	6.64	193.87	59.18	0.27

Fuente: monitoreo de calidad de agua realizado por Argueta, Blandón y Aguilar (2016, pág. 140).

Tabla III. *Valores de los tratamientos utilizados para el desarrollo del modelo, resultados de la réplica dos.*

Tratamiento	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-
	Inicial	Inicial	Inicial	Inicial	Final	Final	Final	Final
1	0.78	19.00	76.00	1.55	0.74	6.81	18.10	0.80
2	13.57	19.00	76.00	1.55	9.24	5.99	108.57	0.61
3	0.78	204.00	76.00	1.55	1.48	124.24	54.29	1.07
4	13.57	204.00	76.00	1.55	12.41	150.35	51.27	0.80
5	0.78	19.00	116.00	1.55	0.30	13.61	76.94	1.23
6	13.57	19.00	116.00	1.55	10.10	14.70	68.06	0.32
7	0.78	204.00	116.00	1.55	1.33	147.18	38.47	1.04
8	13.57	204.00	116.00	1.55	7.50	157.47	47.35	0.16
9	0.78	19.00	76.00	0.10	0.44	2.99	66.35	1.64
10	13.57	19.00	76.00	0.10	3.46	7.08	57.30	0.41
11	0.78	204.00	76.00	0.10	1.40	126.61	27.14	1.36
12	13.57	204.00	76.00	0.10	6.93	150.35	63.33	0.27
13	0.78	19.00	116.00	0.10	0.18	8.71	35.51	2.27
14	13.57	19.00	116.00	0.10	6.93	34.84	47.35	0.09
15	0.78	204.00	116.00	0.10	0.70	192.29	112.45	5.23
16	13.57	204.00	116.00	0.10	6.64	193.08	71.02	0.73

Fuente: monitoreo de calidad de agua realizado por Argueta, Blandón y Aguilar (2016, pág. 143)

Tabla IV. *Valores de los tratamientos utilizados para el desarrollo del modelo, resultados de la réplica tres.*

Tratamiento	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-	NH4+	PO4-3	NO3-	NO2-
	Inicial	Inicial	Inicial	Inicial	Final	Final	Final	Final
1	0.78	19.00	76.00	1.55	0.74	6.81	51.27	0.80
2	13.57	19.00	76.00	1.55	8.66	5.99	96.51	0.85
3	0.78	204.00	76.00	1.55	1.07	124.24	48.25	1.33
4	13.57	204.00	76.00	1.55	7.50	150.35	36.19	0.43
5	0.78	19.00	116.00	1.55	0.74	13.61	71.02	1.60
6	13.57	19.00	116.00	1.55	10.39	14.70	82.86	0.53
7	0.78	204.00	116.00	1.55	0.96	147.18	45.87	1.07
8	13.57	204.00	116.00	1.55	8.08	157.47	59.18	0.32
9	0.78	19.00	76.00	0.10	0.30	2.99	105.56	1.82
10	13.57	19.00	76.00	0.10	11.55	7.08	15.08	0.23
11	0.78	204.00	76.00	0.10	0.81	126.61	36.19	1.73
12	13.57	204.00	76.00	0.10	8.66	150.35	60.32	0.91
13	0.78	19.00	116.00	0.10	1.85	8.71	32.55	2.27
14	13.57	19.00	116.00	0.10	5.77	34.84	44.39	0.73
15	0.78	204.00	116.00	0.10	0.70	192.29	71.02	5.05
16	13.57	204.00	116.00	0.10	6.93	193.08	35.51	0.09

Fuente: monitoreo de calidad de agua realizado por Argueta, Blandón y Aguilar (2016, pág. 146)

Cada muestra que se utiliza para el diseño experimental se coloca al aire libre, en condiciones de temperatura e iluminación natural.

El diseño y análisis estadístico se realiza con el software Statgraphics ®, utilizando la aplicación de diseño de experimentos del tipo factorial completo (2^k).

El resultado del análisis experimental con base en los datos de las tablas II, III y IV, se somete a pruebas de normalidad y análisis de ANOVA multivariante con su respectivo diagrama de Pareto, con el objetivo de analizar la incidencia de los factores y efectos principales de la variable independiente sobre la variable dependiente.

Posteriormente, cada variable se somete a un análisis de ANOVA multifactorial y análisis de modelos de regresión múltiple, obteniéndose los valores del cuadrado medio del error (CME), R-cuadrado ajustado, Cp. de Mallows, valor de criterio de información Bayesiano de Schwarz-Bayesian (SBIC) y criterio de información de Akaike, los cuales permiten definir el modelo que mejor responde al comportamiento final de su concentración inicial con el menor sesgo minimizando del error cuadrado medio con base en los criterios de información indicados.

Resultados obtenidos

El análisis ANOVA que se realiza a la concentración de nitrógeno amoniacal final se muestra en la tabla V, observándose que solo el nitrógeno amoniacal inicial tiene un valor de significancia menor a 5 %, indicando esto que esta variable es significativamente diferente a cero con un nivel de confianza del 95 %, por lo que ésta sí ejerce una influencia sobre la concentración de nitrógeno amoniacal final.

En la tabla VI, se puede observar el resultado del ANOVA que se aplica a la concentración de fosfato final, donde se aprecia que las cuatro variables evaluadas (fosfato, nitrito, nitrato y nitrógeno amoniacal inicial) tienen un efecto significativo sobre la concentración de fosfato final (significancia menor a 5 %).

Tabla V. Análisis de varianza para nitrógeno amoniacal final.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
A: nitrógeno amoniacal inicial	758.907	1	758.907	76.26	<0.050
B: fosfato inicial	17.089	1	17.089	1.72	0.199
C: nitrato inicial	23.185	1	23.185	2.33	0.136
D: nitrito inicial	33.067	1	33.067	3.32	0.077
AB	4.118	1	4.118	0.41	0.524
AC	21.951	1	21.951	2.21	0.146
AD	24.112	1	24.112	2.42	0.129
BC	15.278	1	15.278	1.54	0.224
BD	8.501	1	8.501	0.85	0.362
CD	3.808	1	3.808	0.38	0.540
Bloques	13.179	2	6.590	0.66	0.522
Error total	348.301	35	9.951		
Total (corr.)	1271.500	47			

Tabla VI. Análisis de varianza para fosfato final.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
A: nitrógeno amoniacal inicial	1909.410	1	1909.410	19.540	<0.050
B: fosfato inicial	244931.000	1	244931.000	2505.970	<0.050
C: nitrato inicial	7573.180	1	7573.180	77.480	<0.050
D: nitrito inicial	2214.900	1	2214.900	22.660	<0.050
AB	239.235	1	239.235	2.450	0.127
AC	91.301	1	91.301	0.930	0.340
AD	9.310	1	9.310	0.100	0.759
BC	2345.560	1	2345.560	24.000	<0.050
BD	979.213	1	979.213	10.020	<0.050
CD	1254.200	1	1254.200	12.830	<0.050
Bloques	16.600	2	8.300	0.080	0.919
Error total	3420.860	35	97.739		
Total (corr.)	264984.000	47			

En la tabla VII, se presenta el resultado del ANOVA que se aplica a la concentración de nitrato final, donde se observa que ninguna de las variables presenta un efecto significativo sobre la concentración de nitrato final (significancia menor a 5 %).

En la tabla VIII, se presenta el resultado del ANOVA para la concentración de nitrito final, donde se observa que las cuatro variables analizadas (nitrógeno amoniacal, fosfato, nitrato y nitrito inicial) muestran un efecto significativo sobre la concentración de nitrito final (significancia menor a 5 %).

Tabla VII. Análisis de varianza para nitrato final.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
A: nitrógeno amoniacal inicial	389.367	1	389.367	0.80	0.3763
B: fosfato inicial	1388.79	1	1388.79	2.86	0.0994
C: nitrato inicial	0.302419	1	0.302419	0.00	0.9802
D: nitrito inicial	266.445	1	266.445	0.55	0.4634
AB	116.345	1	116.345	0.24	0.6273
AC	1232.72	1	1232.72	2.54	0.1198
AD	1061.35	1	1061.35	2.19	0.1479
BC	373.469	1	373.469	0.77	0.3861
BD	2298.41	1	2298.41	4.74	<0.050
CD	45.4936	1	45.4936	0.09	0.7612
Bloques	84.5277	2	42.2638	0.09	0.9167
Error total	16969.2	35	484.833		
Total (corr.)	24226.4	47			

Tabla VIII. Análisis de varianza para nitrito final.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
A: nitrógeno amoniacal inicial	26.478	1	26.478	64.070	<0.050
B: fosfato inicial	2.363	1	2.363	5.720	<0.050
C: nitrato inicial	3.302	1	3.302	7.990	<0.050
D: nitrito inicial	11.281	1	11.281	27.300	<0.050
AB	1.821	1	1.821	4.410	<0.050
AC	7.529	1	7.529	18.220	<0.050
AD	8.645	1	8.644	20.920	<0.050
BC	0.656	1	0.656	1.590	0.216
BD	1.474	1	1.474	3.570	0.067
CD	2.799	1	2.799	6.770	<0.050
Bloques	0.169	2	0.084	0.200	0.816
Error total	14.464	35	0.413		
Total (corr.)	80.979	47			

A los datos del diseño experimental se les aplica la prueba de rangos múltiples para cada uno de los efectos principales, con el objetivo de establecer cuáles medias son estadísticamente diferentes (supuesto de igualdad de medias) con el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey.

Este análisis demuestra para la media de la variable nitrógeno amoniacal que únicamente la media de la variable nitrógeno amoniacal inicial es estadísticamente diferente (diferencia = 7.953).

El análisis de medias para la variable fosfato final muestra que, las medias de las variables concentración de nitrógeno amoniacal inicial, fosfato inicial, nitrito inicial y nitrato inicial son estadísticamente diferentes (diferencia de: 12.614, 142.867, 25.122 y 13.586, respectivamente).

Para la variable nitrato final, ninguna de las medias de las variables analizadas es estadísticamente diferente (diferencias de: -5.696, -10.758, -0.159, y -4.712, respectivamente).

Finalmente, para la variable nitrito final, se determina que la media de las variables nitrógeno amoniacal inicial y nitrito final son estadísticamente diferentes (diferencia de: 1.485 y 0.970, respectivamente).

Definidas las variables que ejercen un efecto significativo sobre la variable respuesta, se aplica el análisis de regresión múltiple utilizando las variables independientes; concentración de nitrógeno amoniacal inicial (A); concentración de fosfato inicial (B); concentración de nitrato (C); y concentración de nitrito (D).

Para cada una de las variables dependientes se calcula el estadístico “R-Cuadrado ajustado y sin ajustar”, “Cp., de Mallows”, así como los criterios de información de Akaike (AIC), Hannan y Quinn (HQC) y el método Bayesiano de Schwarz-Bayesiano (SBIC), buscando el modelo que minimiza el criterio de información.

En la tabla IX, se observa el resultado del análisis de regresión, que se aplica a 16 modelos para la variable nitrógeno amoniacal final.

Tabla IX. *Análisis de regresión múltiple a modelos para nitrógeno amoniacal final.*

Modelo	CME	R-Cuadrado	R-Cuadrado ajustado	Cp.	Variables Incluidas
1	27.053	0.000	0.000	78.473	
2	11.143	59.686	58.810	6.180	A
3	27.053	2.128	0.000	78.800	B
4	27.053	2.128	0.000	78.202	C
5	26.922	2.601	0.483	77.235	D
6	11.011	61.030	59.298	6.507	AB
7	10.876	61.510	59.799	5.910	AC
8	10.656	62.287	60.611	4.943	AD
9	27.053	4.255	0.000	78.530	BC
10	27.053	4.255	0.000	77.563	BD
11	27.005	4.424	0.176	76.966	CD
12	10.734	62.854	60.321	6.237	ABC
13	10.510	63.631	61.151	5.270	ABD
14	10.371	64.110	61.663	4.673	ACD
15	27.053	6.383	0.000	77.293	BCD
16	10.215	65.454	62.241	5.000	ABCD

De acuerdo al análisis de regresión que se aplica a la variable nitrógeno amoniacal final (tabla IX), el único modelo que podría considerarse apropiado es el que incluye la variable A (nitrógeno amoniacal inicial), derivado del análisis de medias realizado, sin embargo, éste explica únicamente un 59.69 % de su comportamiento.

De acuerdo con el análisis de medias para la variable fosfato (ver tabla X), las cuatro variables pueden ejercer un efecto significativo sobre la concentración de fosfato final, por lo que en el análisis de regresión se evalúan 16 modelos, siendo el modelo que mejor explica el comportamiento de esta variable el que incluye cuatro variables (variable A-nitrógeno amoniacal inicial, variable B-fosfato inicial, variable C-nitrato final y variable D-nitrito final).

Tabla X. *Análisis de regresión múltiple a modelos para fosfato final.*

Modelo	CME	R-Cuadrado	R-Cuadrado ajustado	Cp.	Variables Incluidas
1	5637.970	0.000	0.000	1317.560	
2	5637.970	2.128	0.000	1309.740	A
3	435.951	92.432	92.268	59.193	B
4	5595.900	2.858	0.746	1280.590	C
5	5637.970	2.128	0.000	1308.170	D
6	403.208	93.153	92.848	51.369	AB
7	5637.970	4.255	0.000	1272.770	AC
8	5637.970	4.255	0.000	1300.340	AD
9	277.346	95.290	95.081	22.223	BC
10	396.419	93.268	92.969	49.796	BD
11	5637.970	4.255	0.000	1271.200	CD
12	240.254	96.011	95.739	14.398	ABC
13	362.033	93.989	93.579	41.970	ABD
14	5637.970	6.383	0.000	1263.370	ACD
15	233.311	96.126	95.862	12.826	BCD
16	194.332	96.847	96.553	5.000	ABCD

Este modelo 16 para fosfato, explica en 96.85 % su comportamiento, asimismo el análisis de mejor criterio de información (ver tabla XI) muestra a este modelo con los menores valores de MSE, AIC, HQC y SBIC, por lo que permite proyectar el comportamiento de fosfato en el efluente en un cultivo de algas *Chlorella*.

El análisis de regresión múltiple a los modelos para nitrato final (tabla XII) respalda la información obtenida en el análisis de medias, el cual establece que ninguna de las variables ejerce un efecto significativo sobre la concentración de nitrato final, dado que ninguno de los modelos explica en más de un 8.5 % la variabilidad de nitrato final, por lo que no se recomienda ningún modelo para esta variable.

Tabla XI. *Análisis de mejor criterio de información a los modelos de la variable fosfato final*

Modelo	Coeficientes	MSE	AIC	HQC	SBIC	Variables Incluidas
1	5	194.332	5.478	5.552	5.673	ABCD
2	4	233.311	5.619	5.678	5.775	BCD
3	4	240.254	5.648	5.707	5.804	ABC
4	3	277.346	5.750	5.794	5.867	BC
5	4	362.033	6.058	6.117	6.214	ABD
6	3	396.419	6.107	6.152	6.224	BD
7	3	403.208	6.124	6.169	6.241	AB
8	2	435.951	6.161	6.190	6.239	B
9	1	5637.970	8.679	8.694	8.718	
10	2	5595.900	8.713	8.743	8.791	C
11	2	5637.970	8.734	8.763	8.812	D
12	2	5637.970	8.735	8.764	8.813	A
13	3	5637.970	8.768	8.812	8.885	CD
14	3	5637.970	8.769	8.814	8.886	AC
15	4	5637.970	8.825	8.884	8.981	ACD
16	194.332	96.847	96.553	5.000	ABCD	

Tabla XII. *Análisis de regresión múltiple a modelos para nitrato final*

Modelo	CME	R-Cuadrado	R-Cuadrado ajustado	Cp.	Variables Incluidas	Variables Incluidas
1	515.455	0.000	0.000	0.964		ABCD
2	515.455	2.128	0.000	2.209	A	BCD
3	496.469	5.733	3.683	0.272	B	ABC
4	515.455	2.128	0.000	2.964	C	BC
5	515.455	2.128	0.000	2.448	D	ABD
6	498.849	7.340	3.221	1.517	AB	BD
7	515.455	4.255	0.000	4.209	AC	AB
8	515.455	4.255	0.000	3.693	AD	B
9	507.495	5.734	1.544	2.271	BC	
10	501.581	6.832	2.692	1.755	BD	C
11	515.455	4.255	0.000	4.447	CD	D
12	510.180	7.341	1.023	3.516	ABC	A
13	504.131	8.440	2.197	3.001	ABD	CD
14	515.455	6.383	0.000	5.692	ACD	AC
15	512.974	6.834	0.481	3.755	BCD	ACD
16	515.455	8.511	0.000	5.000	ABCD	

En la tabla XIII, se observa que el modelo que mejor explica la variabilidad de nitrato es el modelo que incluye las variables A y D, el cual presenta un R-cuadrado de 46.62 %, sin embargo, el porcentaje es muy bajo para considerarlo como un modelo representativo del comportamiento de nitrato, por lo que no se recomienda su utilización.

Considerando que únicamente la variable fosfato presenta un modelo representativo, se aplica a ésta el análisis de regresión múltiple cuyo resultado se muestra en la tabla XIV.

Tabla XIII. *Análisis de regresión múltiple a modelos para nitrato final.*

Modelo	CME	R-Cuadrado	R-Cuadrado ajustado	Cp.	Variables Incluidas	Variables Incluidas
1	1.723	0.000	0.000	46.720		ABCD
2	1.185	32.697	31.234	18.403	A	BCD
3	1.709	2.918	0.808	46.014	B	ABC
4	1.689	4.078	1.993	44.939	C	BC
5	1.515	13.931	12.060	35.803	D	ABD
6	1.159	35.615	32.753	17.698	AB	BD
7	1.138	36.775	33.965	16.622	AC	AB
8	0.960	46.628	44.256	7.487	AD	B
9	1.674	6.996	2.862	44.233	BC	
10	1.496	16.849	13.153	35.097	BD	C
11	1.475	18.009	14.365	34.022	CD	D
12	1.110	39.693	35.581	15.917	ABC	A
13	0.929	49.546	46.106	6.781	ABD	CD
14	0.907	50.706	47.345	5.706	ACD	AC
15	1.455	20.927	15.535	33.316	BCD	ACD
16	0.873	53.624	49.310	5.000	ABCD	

Tabla XIV. *Análisis de regresión múltiple al modelo de fosfato final.*

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor -P
Constante	-62.6417	10.6560	-5.8786	<0.050
Nitrógeno amoniacal inicial	0.9863	0.3146	3.1346	<0.050
Fosfato inicial	0.7722	0.0218	35.5017	<0.050
Nitrato inicial	0.6280	0.1006	6.2426	<0.050
Nitrato inicial	-9.3695	2.7753	-3.3760	<0.050

Discusión de resultados

Como puede observarse en la tabla XIV, la significancia de las variables involucradas en el modelo de fosfato es menor a 5 %, por lo que éstas si ejercen un efecto significativo sobre la concentración de fosfato final.

Con base en este análisis, se desarrolla la ecuación 1, la cual permite relacionar la concentración de fosfato final con el nitrógeno amoniacal inicial, el nitrato inicial, el nitrato inicial y el fosfato inicial.

$$Bf = (-62.642) + 0.986 (Ai) + 0.772 (Bi) + 0.628 (Ci) - 9.370 (Di) \tag{1}$$

donde:

(Bf) = fosfato final (miligramos por litro)

(Ai) = nitrógeno amoniacal inicial (miligramos por litro)

(Bi) = fosfato inicial (miligramos por litro)

(Ci) = nitrato inicial (miligramos por litro)

(Di) = nitrato inicial (miligramos por litro)

El estadístico R-Cuadrado ajustado del modelo, indica que éste explica el 96.553 % de la variabilidad del fosfato final, con una desviación estándar de los residuos de 13.9403. El error absoluto medio (MAE) presenta un valor de 10.483. El valor de “p” para el estadístico de Durbin-Watson (p-DW=0.3656) es mayor a 5 %, por lo que no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95 %.

Este modelo se somete a verificación utilizando las concentraciones de nutrientes que se obtiene en el estudio de Argueta, Blandón y Aguilar (2016), observándose con ello, que el nivel de predicción es muy cercano al valor real obtenido (ver tabla XV), dando en promedio una remoción de fosfato del 31 %, con lo cual se confirman los estudios que indican que los cultivos de alga Chlorella, son eficientes en la remoción de nutrientes.

Tabla XIV. *Análisis de regresión múltiple al modelo de fosfato final.*

Nitrógeno Amoniacal inicial (mg/l)	Fosfato inicial (mg/l)	Nitrato inicial (mg/l)	Nitrito inicial (mg/l)	Fosfato Final (mg/l)	Fosfato estimado con t
3.89	20.70	96.89	0.17	14.40	16.47
4.29	22.50	98.21	0.17	12.10	19.09
4.16	22.60	94.82	0.13	13.80	17.22
13.15	22.20	80.34	0.20	14.50	16.06
10.51	21.10	74.54	0.26	21.70	8.34
11.26	22.20	90.99	0.30	16.50	19.96
8.08	23.70	76.47	0.26	16.60	9.17
9.66	24.60	93.50	0.13	16.40	23.36
8.64	24.70	82.28	0.17	18.30	15.07

De acuerdo con el modelo que se obtiene para estimar el comportamiento de fosfato en un cultivo mixto de alga *Chlorella*, se puede establecer que la fitorremediación en un cultivo mixto de alga *Chlorella* desarrollada de forma natural en el efluente del filtro percolador de una planta de tratamiento de agua residual, reduce en promedio un 31 % la concentración de fosfato.

El dato obtenido difiere con los resultados obtenidos en los estudios realizados por Whangchenchom, Chiemchaisri, Tapaneeyaworawong y Powtongsook (2014) quienes reportan haber obtenido para fosfatos “una reducción de más del 75 %, tanto para las muestras del reactor MLSS como para el decantador” (pág. 286).

Sin embargo, debe considerarse lo explicado por Hernández Pérez y Labbé (2014, pág. 163), quienes indican que los valores de remoción asignados a cada nutriente varían en función del tipo de cultivo, tipo de reactor, condiciones climáticas (intensidad de luz y temperatura) y características del proceso de tratamiento previo (íntimamente relacionado a la calidad del agua residual en el cual se realiza el cultivo) y tiempo de cultivo (tiempo de retención). Evidenciado esto en el resultado en el presente estudio, el cual se realiza en condiciones no controladas de iluminación y temperatura.

Es importante resaltar que el modelo propuesto

para definir el comportamiento de la concentración de fosfato en un medio mixto de algas *Chlorella*, muestra claramente que la concentración de fosfato final (luego de 7 días) no depende únicamente de la concentración inicial de nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fosfato, ya que la constante del modelo muestra que ésta se encuentra afectada en su mayoría por otros factores que deben ser incorporados para tener una mejor claridad del comportamiento de la concentración de fosfato, tales como la concentración de DBO (carbono), potencial de hidrógeno, disponibilidad de luz, tipo y población de bacterias, así como tipo y población de algas (González González, 2010, pág. 11).

La reducción de fosfato alcanzada en el presente estudio, se traduce en un mecanismo de mitigación a los procesos de eutrofización de los cuerpos de agua que reciben efluentes de estaciones depuradoras, dado que los aportes de nutrientes de éstas son una de las principales causas que potencian la eutrofización en lagos, según lo expresa Gallego Schmid (2008) al indicar que estas “contribuyen por arriba de un 55 % en la carga eutrofizante del agua” (págs. 7-20).

Conclusiones

Los resultados obtenidos (concentraciones finales) para nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fosfato, se utilizan para la modelación estadística, a diferencia del trabajo realizado por Argueta, Blandón y Aguilar (2016), quienes proponen modelos estadísticos utilizando un análisis correlacional canónico con porcentajes de remoción, habiéndose obtenido en este estudio que ninguno de los modelos podría explicar el comportamiento de la concentración inicial de nutrientes.

El resultado de este estudio y el análisis realizado en el mismo, permiten establecer que la mejor manera de proponer un modelo de comportamiento de nutrientes es a través de un análisis de correlación múltiple, dado que lo que se busca es predecir el comportamiento de una variable dependiente a partir de múltiples variables independientes y no el comportamiento de un conjunto de variables

dependientes, a partir de un grupo de variables independientes.

Utilizando análisis de regresión múltiple para relacionar el comportamiento de las concentraciones finales de nitrógeno amoniacal, fosfato, nitrito, y nitrato con sus respectivas concentraciones iniciales, en cultivos mixtos de alga *Chlorella* con bacterias, se identifica que el modelo propuesto para fosfato define su variabilidad con un 96.55 % de confianza.

Recomendaciones

1. Profundizar en el análisis de interrelación alga-bacteria, así como incorporar otras variables en los modelos de predicción, como oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno y potencial de hidrógeno.
2. Desarrollar estudios que permitan la implementación de reactores con cultivos de alga *Chlorella*, para la remoción de nutrientes en las estaciones depuradoras de agua residual.

Referencias bibliográficas

- Argueta Gálvez, J. E., Blandón Blandón, R. A., & Aguilar Carrera, F. A. (2016). *Modelo matemático para determinar el nivel de eficiencia de remoción de nutrientes a través de algas clorofitas después de los filtros percoladores en tratamiento de aguas residuales*. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria USAC.
- Gallego Schmid, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología de análisis del ciclo de vida: desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- González González, L. M. (2010). *Influencia de la deficiencia de nitrógeno y fósforo en las interacciones competitivas entre *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus acutus**. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Guerra Quemé, H. D., Zea Cano, M. A., & Aguilar Carrera, F. A. (2015). *Identificación de pre-*

sencia de algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala y de la planta de tratamiento. Ing. Arturo Pazos Sosa. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria USAC.

- Hernández Pérez, A., & Labbé, J. (2014). *Microalgas, cultivo y beneficios*. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 157-173.
- Ruiz Martínez, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Salazar González, M. (2009). *Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas*. Contactos 73, 16-22.
- Sriram, S., & Seenivasan, R. (2012). *Microalgae cultivation in wastewater for nutrient removal*. Journal of algal biomass utilization, 9-13.

Información del autor

- Ingeniero Civil, Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 1993.
- Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996.
- Doctor en Cambio Climático y Sostenibilidad, Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017.
- Afiliación laboral: Profesor titular de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.