



UPSE

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TEMA

EVALUACIÓN DEL ÁCIDO MONOSILÍCICO EN EL CRECIMIENTO DE
DIATOMEAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE AGUA DE
PRECRÍAS DE CAMARÓN *Penaeus vannamei*, CANTÓN YAGUACHI.

AUTORA

BLGA. GEMA LILIANA ALCÍVAR INTRIAGO

TRABAJO DE TITULACIÓN
Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN ACUICULTURA

TUTORA

PHD. GEOVANNA PARRA RIOFRÍO.

Santa Elena, Ecuador

Año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE GRADO**

Los suscritos calificadores, aprueban el presente trabajo de titulación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por el Instituto de Postgrado de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**ROXANA DEL CARMEN
ALVAREZ ACOSTA**

**PhD. Roxana Álvarez Acosta
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**GEOVANNA BELEN
PARRA RIOFRIO**

Firmado digitalmente por
GEOVANNA BELEN PARRA
RIOFRIO
Fecha: 2026.09.17 10:17:24
-05'00'

**PhD. Geovanna Parra Riofrío
TUTORA**



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**DANIEL EDUARDO
LEMUS SARES**

**MSc. Daniel Lemus Sares
ESPECIALISTA 1**



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JOSE JERRY LANDIVAR
ZAMBRANO**

**PhD. Jerry Landivar Zambrano
ESPECIALISTA 2**



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**MARIA MARGARITA
RIVERA GONZALEZ**

**Ab. María Rivera González, Mgs.
SECRETARIA GENERAL UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN:

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Gema Liliana Alcívar Intriago**, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Acuicultura.

Atentamente,

**GEOVANNA BELEN
PARRA RIOFRIO**

Firmado digitalmente por
GEOVANNA BELEN PARRA RIOFRIO
Fecha: 2026.09.17 10:17:42 -05'00'

PhD. Geovanna Parra Riofrío
TUTORA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Alcívar Intriago Gema Liliana

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, EVALUACIÓN DEL ÁCIDO MONOSILÍCICO EN EL CRECIMIENTO DE DIATOMEAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE AGUA DE PRECRÍAS DE CAMARÓN *Penaeus vannamei*, CANTÓN YAGUACHI, previo a la obtención del título en Magíster en Acuicultura, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, a los veinticuatro días del mes de Julio de año 2026



Firmado electrónicamente por:
**GEMA LILIANA
ALCIVAR INTRIAGO**

Blga. Gema Liliana Alcívar Intriago
AUTORA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, Alcívar Intriago Gema Liliana

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de la investigación **EVALUACIÓN DEL ÁCIDO MONOSILÍCICO EN EL CRECIMIENTO DE DIATOMEAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE AGUA DE PRECRÍAS DE CAMARÓN *Penaeus vannamei***, CANTÓN YAGUACHI, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este informe de investigación dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, a los veinticuatro días del mes de Julio de año 2026



Firmado electrónicamente por:
**GEMA LILIANA
ALCIVAR INTRIAGO**

**Blga. Gema Liliana Alcívar Intriago
AUTORA**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **EVALUACIÓN DEL ÁCIDO MONOSILÍCICO EN EL CRECIMIENTO DE DIATOMEAS Y SU INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE AGUA DE PRECRÍAS DE CAMARÓN *Penaeus vannamei***, CANTÓN YAGUACHI, presentado por el estudiante, **GEMA LILIANA ALCÍVAR INTRIAGO** fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 0%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

Gema Alcivar

Tesis_Alcivar

Quick Submit
Quick Submit
INTEGRACIÓN CURRICULAR - TITULACIÓN

Detalles del documento

Identificador de la entrega: 13654295015

Fecha de entrega: 23 jul 2026, 8:08 p.m. GMT-5

Fecha de descarga: 23 jul 2026, 8:15 p.m. GMT-5

Nombre del archivo: Alcivar_Turnitin.docx

Tamaño del archivo: 3.5 MB

35 páginas
10.418 palabras
61.040 caracteres



Página 2 de 10 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: 13654295015

0% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para el...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N° de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 0% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N° de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarse. Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y lo revise.

turnitin Página 1 de 10 - Portada

Identificador de la entrega: 13654295015

GEOVANNA BELEN PARRA RIOFRIO Firmado digitalmente por
GEOVANNA BELEN PARRA RIOFRIO
Fecha: 2026.09.17 10:18:54 -05'00'

PhD. Geovanna Parra Riofrío.
TUTORA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme a lo largo de mi carrera y ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y permitirme culminar esta etapa.

A mi familia, especialmente a mi esposo y a mis hijos por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A mi compañero de trabajo, Jorge Ortega, por su tiempo, amistad y apoyo durante este proceso. De manera especial, expreso mi gratitud a Manuel Terreros quien fue mi jefe y cuya orientación, confianza y enseñanzas contribuyeron significativamente a mi crecimiento profesional.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a empresa BIOBAC por abrirme sus puertas y brindarme las facilidades y el apoyo necesario para llevar a cabo esta investigación.

Un agradecimiento especial a mi tutora Geovanna Parra, quien fue maestra y guía para la culminación de este proyecto de investigación.

BLGA. GEMA LILIANA ALCÍVAR INTRIAGO

DEDICATORIA

A mis hijos Zoe y Jorge

Por ser mi mayor inspiración y motivación día a día, su amor, paciencia y comprensión me dieron el valor para seguir adelante y culminar este objetivo de vida planteado.

Cada esfuerzo y sacrificio durante esta tesis representa el deseo de ser ejemplo para Uds. Todo lo que te propongas con objetivos claros se cumplen mientras tengas disciplina y dedicación. ¡el éxito está en insistir!

BLGA. GEMA LILIANA ALCÍVAR INTRIAGO

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	VI
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
3. JUSTIFICACIÓN	6
4. OBJETIVOS	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos.....	7
5. HIPÓTESIS	8
6. MARCO TEÓRICO	9
6.1. Acuicultura de camarón <i>Penaeus vannamei</i> en Ecuador	9
6.2. Calidad de agua en sistemas de precrías	10
6.2.1. Nitrógeno.....	11
6.2.2. Fósforo	13
6.3. Dinámica de fitoplancton en sistemas acuícolas	14
6.4. Diatomeas y su importancia en la Acuicultura.....	15
6.5. Ácido monosilícico y crecimiento de diatomeas.....	18
6.6. Antecedentes investigativos	19
7. METODOLOGÍA	20
7.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
7.2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO	21
7.3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	21
7.4. MATERIALES Y EQUIPOS.....	22

7.5.	PREPARACIÓN DE LAS PISCINAS	23
7.6.	Evaluación del ácido monosilícico.....	24
7.7.	Monitoreo de variables ambientales del agua	25
7.8.	Cuantificación de fitoplancton y parámetros de crecimiento	26
7.9.	Análisis estadístico	28
8.	RESULTADOS.....	29
8.1.	Abundancia de diatomeas.....	29
8.2.	Velocidad y tasa de crecimiento.....	31
8.3.	Composición relativa del fitoplancton	32
8.4.	Composición final del fitoplancton	33
8.5.	Variaciones de parámetros fisicoquímicos	34
8.6.	Correlación entre la abundancia de diatomeas y los parámetros fisicoquímicos del agua.....	35
8.7.	Análisis de componentes principales	36
9.	DISCUSIÓN.....	37
10.	CONCLUSIONES.....	42
11.	RECOMENDACIONES.....	43
12.	REFERENCIAS	45
13.	ANEXOS	58

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i>	Resumen de las exportaciones ecuatorianas de camarón en los últimos 10 años ...	9
<i>Tabla 2.</i>	Principales parámetros ambientales y rangos deseados en cultivo de camarón <i>Penaeus vannamei</i>	11
<i>Tabla 3.</i>	Influencia de las diatomeas en la acuicultura de camarón	15
<i>Tabla 4.</i>	Insumos usados durante la presente investigación	23
<i>Tabla 5.</i>	Protocolo de dosificación de los tratamientos.....	25
<i>Tabla 6.</i>	Rutina de muestreo durante la evaluación.....	25
<i>Tabla 7.</i>	Comparación de velocidad y tasa de crecimiento de diatomeas entre los tratamientos	31
<i>Tabla 8.</i>	Variación porcentual de los principales grupos fitoplanctónicos	32
<i>Tabla 9.</i>	Análisis estadístico Kruskal Wallis.....	35
<i>Tabla 10.</i>	Coefficiente de correlación Pearson (r) entre la abundancia de diatomeas y parámetros fisicoquímicos.....	36
<i>Tabla 11.</i>	Cronograma de actividades de tesis de grado	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.</i> Ciclo del nitrógeno en piscinas de producción de camarón. Adaptado de Chen et al., 2024	12
<i>Ilustración 2.</i> Ciclo del fósforo en estanques de producción de camarón. Adaptado de Bai et al. (2023).....	13
<i>Ilustración 3.</i> Diseño experimental con sus respectivos tratamientos y replicas	22
<i>Ilustración 4.</i> Metodología usada para el conteo fitoplanctónico	27
<i>Ilustración 5.</i> Resultados de la abundancia de diatomeas	30
<i>Ilustración 6.</i> Cambios en la abundancia relativa (%) de diatomeas, cianofitas y clorofias	33
<i>Ilustración 7.</i> Composición final del fitoplancton de acuerdo al tratamiento usado	34
<i>Ilustración 8.</i> Análisis de componentes principales (PCA) de las variables fisicoquímicas y de la comunidad fitoplanctónica en los tratamientos Control, T1 y T2. Las flechas representan la contribución de las variables al ordenamiento, mientras que las elipses indican la dispersión de las muestras para cada tratamiento.	36
<i>Ilustración 9.</i> Prueba Shapiro-willks aplicada para observar normalidad de los parámetros evaluados.	58
<i>Ilustración 10.</i> Prueba ANOVA de una vía sin diferencia significativa entre tratamientos del muestreo #7.....	58
<i>Ilustración 11.</i> Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (AT, NH ₃ Tóxico, NO ₂ , NO ₃).....	59
<i>Ilustración 12.</i> Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (PO ₄ , Relación N:P, SiO ₂ y Oxígeno).	59
<i>Ilustración 13.</i> Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (pH, Temperatura y Salinidad).	60
<i>Ilustración 14.</i> Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento 1 (T1).....	60
<i>Ilustración 15.</i> Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento 2 (T2).....	60
<i>Ilustración 16.</i> Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento Control (T0).....	60
<i>Ilustración 17.</i> Vista al microscopio de diatomeas con objetivo de 40x	61
<i>Ilustración 18.</i> Recolección de muestras en campo	62

RESUMEN

Las diatomeas desempeñan un papel fundamental en los sistemas de cultivo de *Penaeus vannamei* al contribuir a la estabilidad de la calidad del agua y al equilibrio fitoplanctónico. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de ácido monosilícico sobre el crecimiento de las diatomeas y la calidad del agua durante la fase de precría. Se establecieron tres tratamientos: un control (T0) sin aplicación de ácido monosilícico; una dosis recomendada por el fabricante (T1: 3 L/ha inicial y 2 L/ha semanales); y una dosis superior (T2: 5 L/ha inicial y 3 L/ha semanales), durante un periodo de 20 días. Los datos fueron analizados mediante ANOVA, Kruskal–Wallis, correlación de Pearson y análisis de componentes principales (PCA). Se observó un incremento en la abundancia relativa de diatomeas y una disminución de cianobacterias en los tratamientos suplementados; sin embargo, la abundancia absoluta de diatomeas no presentó diferencias significativas entre tratamientos. Las diferencias estadísticas se registraron únicamente en la relación N:P, el SiO₂ y el oxígeno disuelto, indicando que el ácido monosilícico modificó la dinámica nutricional sin alterar la estabilidad fisicoquímica del sistema.

Palabras clave: Ácido monosilícico; diatomeas; calidad del agua.

ABSTRACT

Diatoms play a fundamental role in *Penaeus vannamei* culture systems by contributing to water quality stability and phytoplankton community balance. This study aimed to evaluate the effects of monosilicic acid application on diatom growth and water quality during the nursery phase. Three treatments were established: a control (T0) without monosilicic acid application; the manufacturer-recommended dose (T1: an initial application of 3 L/ha followed by 2 L/ha weekly); and a higher dose (T2: an initial application of 5 L/ha followed by 3 L/ha weekly), over a 20-day period. Data were analyzed using ANOVA, the Kruskal–Wallis test, Pearson correlation analysis, and principal component analysis (PCA). An increase in the relative abundance of diatoms and a decrease in cyanobacteria were observed in the supplemented treatments; however, the absolute abundance of diatoms did not differ significantly among treatments. Statistically significant differences were observed only in the N ratio, SiO₂ concentration, and dissolved oxygen, indicating that monosilicic acid altered nutrient dynamics without affecting the physicochemical stability of the system.

Keywords: Monosilicic acid; diatoms; water quality.

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura, el cultivo del camarón blanco *Penaeus vannamei* ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, consolidándose como una de las principales actividades acuícolas a nivel mundial (FAO, 2024; Anderson et al. 2019). La gran capacidad de adaptación a diversos rangos de salinidad (desde 3 ppt a 45 ppt) ha facilitado esa expansión (Li et al., 2007; Moreno-Figueroa et al., 2014; Chong-Robles et al., 2014). Sin embargo, la intensificación del cultivo ha incrementado la presión sobre los sistemas de producción, particularmente durante la fase de precría, donde la calidad del agua es uno de los factores determinantes para el éxito del cultivo (Hernández-Gurrola, 2016; Anderson et al., 2016).

El nivel de control técnico, que incluye infraestructura especializada, aireación continua, manejo intensivo y monitoreo constante de la calidad del agua, incrementa significativamente los costos de implementación (Mishra et al., 2008), lo que ha obligado al sector a la búsqueda de innovación para disminuir esos costos. La utilización de precrías ha sido ampliamente utilizada como una estrategia previa para mejorar la productividad del sistema, permitiendo una mejor supervivencia y adaptación de los organismos en etapas posteriores del cultivo (Vargas-Domínguez, 2023). En este contexto, diversos estudios han evaluado diferentes densidades de siembra en sistemas de cultivo de agua clara, evidenciando la importancia del manejo de la densidad en el desempeño productivo (Moss & Moss, 2004; Cohen et al., 2005; Arambul-Muñoz et al. (2019)

Diversos estudios señalan que, aunque *Penaeus vannamei* posee una amplia capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales; sin embargo, las variaciones abruptas en parámetros como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH pueden comprometer su equilibrio fisiológico, disminuir la respuesta inmune (Alpuche et al., 2005; Jiménez-Guzmán, 2009) y favorecer la aparición de enfermedades (Orellana-Tandazo, 2000; Palafox y Soto, 2001; Molina y Orellana-Tandazo, 2001; Arzola-González et al., 2008; Jiménez-Guzmán, 2009; Kathyayani et al., 2019).

En línea con ello, una elevada carga orgánica dentro del sistema de producción puede alterar los parámetros fisicoquímicos del agua, provocando desequilibrios fisiológicos en el camarón y comprometiendo la estabilidad sobre el cultivo (Ariadi et al., 2019). Como consecuencia el sistema presenta una dinámica altamente variable, donde pequeñas fluctuaciones en los parámetros pueden generar condiciones de estrés significativo para el camarón.

Uno de los principales problemas en sistemas de cultivo intensivo es el manejo inadecuado de compuestos nitrogenados como el amonio, nitrito y nitrato, los cuales se generan por la excreción del camarón, la descomposición del alimento no consumido y la materia orgánica en general (Hong et al., 2020; Frías-Espéricueta y Páez-Osuna, 2001), los que en concentraciones elevadas, pueden causar efectos tóxicos que afectan la tasa de crecimiento, la conversión alimenticia y la supervivencia de los organismos en cultivo (Yun et al., 2025). La aplicación de fuentes silíceas como la diatomita (óxido de silicio) y zeolitas en sistemas biofloc, evidencian mejoras en la calidad del agua y en parámetros productivos del camarón (Martínez-Montaña et al., 2020), resultando en una mayor ganancia de peso, tasa de crecimiento y mejor conversión alimenticia (Ghasemi et al., 2018; Ali et al., 2025). Sin embargo, el uso de ácido monosilícico como fuente directa asimilable de silicio para las diatomeas, ha sido poco evaluado en el contexto de cultivos acuícolas, y aún menos, en sistemas de precría en Ecuador.

Frente a este escenario, surge la necesidad de evaluar fuentes de silicio de mayor biodisponibilidad. El ácido monosilícico (H_4SiO_4) constituye la principal forma biodisponible de silicio disuelto en ambientes acuáticos y desempeña un papel esencial en la productividad de los ecosistemas acuáticos al ser un nutriente indispensable para el crecimiento de las diatomeas (Martin-Jézéquel et al., 2000; Kolbe & Brunner, 2022; Exley et al., 2019). En acuicultura, el interés por la suplementación con ácido monosilícico ha aumentado debido a su potencial para promover comunidades fitoplanctónicas dominadas por diatomeas, las cuales contribuyen a estabilizar la calidad del agua mediante la captación de nutrientes, la producción de oxígeno y la reducción del riesgo de proliferaciones de microorganismos nocivos (Tarunamulia et al., 2026).

El establecimiento de una comunidad fitoplanctónica equilibrada puede mejorar las condiciones ambientales de los sistemas de cultivo, disminuir el estrés fisiológico de los organismos y favorecer su crecimiento y supervivencia. Por ello, el ácido monosilícico se perfila como una herramienta prometedora para el manejo preventivo de sistemas acuícolas, especialmente durante las etapas de precría, donde la estabilidad de la calidad del agua resulta determinante para el éxito productivo.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de dos dosis de ácido monosilícico sobre el crecimiento de las diatomeas y su influencia en la calidad del agua durante la fase de precría de *Penaeus vannamei*. Además, se busca determinar si la suplementación con este compuesto favorece el establecimiento de comunidades fitoplanctónicas dominadas por diatomeas y contribuye a mantener condiciones ambientales más estables en el sistema de cultivo. Los resultados obtenidos permitirán generar información técnica y científica que respalde el uso del ácido monosilícico como una estrategia preventiva para optimizar el manejo de los sistemas de precría, promoviendo una mejor calidad del agua y fortaleciendo la sostenibilidad de la producción acuícola.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La intensificación de los sistemas de precría de *Penaeus vannamei* ha incrementado la productividad mediante el uso de altas densidades de cultivo y el suministro continuo de alimento balanceado. Sin embargo, esta estrategia también genera una mayor acumulación de materia orgánica proveniente del alimento no consumido y de las excretas de los organismos, lo que incrementa las concentraciones de compuestos nitrogenados y fosfatados en el agua (Herath & Satoh, 2015). Como consecuencia, se favorecen procesos de eutrofización que alteran el equilibrio ecológico del sistema y deterioran progresivamente la calidad del agua (Yang et al., 2008; Khalili & Moridi, 2025; Chislock et al., 2013).

El enriquecimiento de nutrientes promueve el desarrollo excesivo del fitoplancton y en particular de grupos potencialmente indeseables como cianobacterias y algunos dinoflagelados. Estas proliferaciones pueden ocasionar fluctuaciones pronunciadas en parámetros críticos como el oxígeno disuelto, el pH y la transparencia del agua,

incrementando el estrés fisiológico de los organismos cultivados (Paerl et al., 2001; Boyd, 2019; Dorgham 2013), reduciendo su crecimiento y eficiencia alimenticia, e incluso provocando mortalidades, especialmente durante las etapas tempranas del cultivo, cuando los camarones presentan mayor sensibilidad a las variaciones ambientales (Wedemeyer, 1996; Brenckman et al., 2025).

Las diatomeas representan un componente fundamental del fitoplancton debido a su capacidad para absorber nitrógeno y fósforo mediante procesos fotosintéticos, contribuir a la producción de oxígeno y servir como fuente de alimento natural (Benoiston et al., 2017). Estas características las convierten en organismos clave para el mantenimiento de la calidad del agua y la estabilidad ecológica de los sistemas acuícolas (Chinnasamy et al., 2010; Gómez-Luna, 2007). No obstante, el crecimiento y la dominancia de las diatomeas dependen de la disponibilidad de silicio en su forma biodisponible. El ácido monosilícico (H_4SiO_4), es indispensable para la formación de sus frústulas silíceas y para el desarrollo normal de sus poblaciones (Annenkov et al., 2021). Cuando este nutriente es limitante, las diatomeas disminuyen la división celular y la competitividad de las diatomeas, favoreciendo el predominio de otros grupos fitoplanctónicos menos deseables (Aram et al., 2024; Stieg et al., 2024).

A pesar de la relevancia del silicio para la dinámica del fitoplancton, este elemento continúa siendo uno de los parámetros menos considerados en los programas rutinarios de monitoreo de la calidad del agua en la acuicultura. En consecuencia, existe escasa información sobre el efecto de la suplementación con ácido monosilícico en la promoción de comunidades de diatomeas y su potencial para mejorar la calidad del agua en sistemas intensivos de precría de *P. vannamei*. Esta falta de evidencia científica limita el desarrollo de estrategias de manejo preventivo orientadas a fortalecer el equilibrio biológico del sistema y reducir la dependencia de medidas correctivas frente al deterioro de las condiciones ambientales.

En este escenario, surge la necesidad de evaluar el efecto de diferentes dosis de ácido monosilícico sobre el crecimiento de las diatomeas y su influencia en la calidad del agua durante la precría de *Penaeus vannamei*. La generación de este conocimiento permitiría determinar el potencial del ácido monosilícico como una herramienta de manejo ecológico

para favorecer comunidades fitoplanctónicas beneficiosas, mejorar la estabilidad ambiental del cultivo y contribuir al desarrollo de sistemas acuícolas más sostenibles y resilientes.

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica por abordar uno de los principales desafíos de la acuicultura intensiva de *Penaeus vannamei*, el deterioro progresivo de la calidad del agua como consecuencia de la acumulación de compuestos nitrogenados y materia orgánica durante la etapa de precría. Esta fase constituye un periodo crítico del ciclo productivo, ya que los organismos presentan una mayor sensibilidad a las fluctuaciones ambientales y cualquier alteración en las condiciones del cultivo puede afectar su crecimiento, incrementar el estrés fisiológico, comprometer la respuesta inmunológica y reducir significativamente la supervivencia y el desempeño productivo en las etapas posteriores del engorde. En este contexto, resulta indispensable desarrollar estrategias preventivas que permitan mantener la estabilidad ecológica del sistema y minimizar los riesgos asociados al deterioro de la calidad del agua.

Bajo este análisis, la investigación propone evaluar el uso de ácido monosilícico como fuente biodisponible de silicio para estimular el crecimiento de diatomeas, un grupo de microalgas ampliamente reconocido por su elevada capacidad para asimilar nutrientes inorgánicos, particularmente nitrógeno y fósforo, contribuyendo al control natural de la eutrofización y al mantenimiento del equilibrio biológico en los sistemas acuáticos. Por lo que, favorecer el establecimiento de comunidades fitoplanctónicas dominadas por diatomeas podría representar una alternativa de manejo ambientalmente sostenible, al mejorar la calidad del agua, reducir la proliferación de organismos fitoplanctónicos indeseables y disminuir la necesidad de recambios frecuentes de agua.

Este estudio contribuirá a ampliar el conocimiento sobre la relación entre la disponibilidad de ácido monosilícico, la dinámica de las comunidades de diatomeas y los cambios en la calidad del agua durante la precría de *Penaeus vannamei*, un tema que ha recibido escasa atención en la investigación acuícola. La información generada permitirá comprender el papel del silicio como un nutriente funcional dentro de los sistemas de cultivo

y establecer bases técnicas para su incorporación en programas de manejo preventivo de la calidad del agua.

Finalmente, la investigación posee una importante relevancia práctica y ambiental. De demostrarse la efectividad del ácido monosilícico, su aplicación podría convertirse en una herramienta de manejo para incrementar la estabilidad de los sistemas de precría, optimizar las condiciones ambientales del cultivo y reducir los costos operativos asociados al bombeo y recambio de agua. Asimismo, los resultados obtenidos podrán servir como base para futuras investigaciones sobre el uso de micronutrientes y la manipulación de comunidades microalgales como estrategias de biorremediación y manejo ecológico en sistemas acuícolas intensivos.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del ácido monosilícico, como fuente de silicio biodisponible, sobre el crecimiento de las diatomeas y su influencia sobre la calidad del agua durante la etapa de precría de *Penaeus vannamei*.

4.2. Objetivos específicos

1. Establecer el efecto de diferentes dosis de ácido monosilícico sobre el crecimiento y abundancia de diatomeas en sistemas de precría de *Penaeus vannamei*.
2. Determinar las variaciones en los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua asociadas a la aplicación de ácido monosilícico en las precrías de camarón.
3. Analizar si existe una relación de la abundancia de diatomeas respecto a los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua asociadas a la aplicación de ácido monosilícico en las precrías de *Penaeus vannamei*.

5. HIPÓTESIS

H0. La aplicación de ácido monosilícico en dosis crecientes (T1 y T2) durante la etapa de precría no genera diferencias significativas en el crecimiento de diatomeas y la calidad del agua del cultivo de camarón *Penaeus vannamei* en comparación con el tratamiento control (T0).

Ha. La aplicación de ácido monosilícico en dosis crecientes (T1 y T2) durante la etapa de precría mejora significativamente el crecimiento de diatomeas y la calidad del agua del cultivo de camarón *Penaeus vannamei* en comparación con el tratamiento control (T0).

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Acuicultura de camarón *Penaeus vannamei* en Ecuador

La acuicultura del camarón constituye una de las actividades productivas más importantes del Ecuador y representa el principal rubro de exportación no petrolero del país. Desde el inicio de su desarrollo comercial en la década de 1970 (Cueva et al., 2007), el sector ha experimentado un crecimiento sostenido impulsado por la incorporación de nuevas tecnologías de cultivo, el mejoramiento genético de *Penaeus vannamei*, la implementación de programas de bioseguridad y la optimización de las prácticas de manejo. En la actualidad, Ecuador es reconocido como uno de los mayores productores y exportadores de camarón a nivel mundial (Villarreal, 2023) abasteciendo mercados altamente exigentes como China, Estados Unidos y la Unión Europea (<https://www.cna-ecuador.com>). Este liderazgo ha sido posible gracias a la combinación de condiciones ambientales favorables, una amplia experiencia técnica y una creciente adopción de sistemas de producción orientados a maximizar la eficiencia y la sostenibilidad. La tabla 1 presenta un resumen productivo y exportado en los últimos 10 años.

Tabla 1. Resumen de las exportaciones ecuatorianas de camarón en los últimos 10 años

Año	Volumen exportado (millones de libras)	Volumen (toneladas métricas)*	Valor FOB (millones USD)
2015	720.3	326,727	2,305
2016	799.9	362,816	2,455
2017	938.6	425,756	2,861
2018	1,115.2	505,852	3,199
2019	1,407.9	638,642	3,653
2020	1,491.1	676,390	3,612
2021	1,855.6	841,700	5,079
2022	2,338.7	1,060,835	6,653
2023	2,676.6	1,214,087	6,289

Fuente: <https://www.cna-ecuador.com>

El incremento de la demanda internacional ha promovido una intensificación progresiva de los sistemas de cultivo, caracterizada por mayores densidades de siembra, incremento en la frecuencia de alimentación y una mayor utilización de tecnologías de aireación y manejo del agua. Aunque estas estrategias han permitido aumentar

significativamente la productividad por unidad de superficie, también han generado nuevos desafíos relacionados con el mantenimiento de la calidad del agua, el control de enfermedades y la sostenibilidad ambiental de la actividad. La acumulación de materia orgánica y nutrientes derivados del alimento no consumido y de las excretas favorece procesos de eutrofización, alteraciones en la comunidad fitoplanctónica y fluctuaciones de parámetros fisicoquímicos como el oxígeno disuelto, el pH y la concentración de compuestos nitrogenados, factores que pueden comprometer el crecimiento, la supervivencia y el rendimiento productivo del camarón.

Ante estos desafíos, la investigación y el desarrollo de alternativas de manejo basadas en procesos ecológicos han cobrado creciente interés dentro de la camaronicultura moderna. Entre ellas destaca el manejo de comunidades fitoplanctónicas beneficiosas para remover nutrientes inorgánicos, producir oxígeno y contribuir al equilibrio biológico del sistema las convierte en un componente clave para mejorar la calidad del agua.

6.2. Calidad de agua en sistemas de precrías

Los sistemas de cultivo de precría se caracterizan por manejar altas densidades de siembra y en esta fase larvaria los organismos se preparan para el inicio de engorde del camarón, teniendo como principal objetivo mantener postlarvas en condiciones controladas para alcanzar tallas de alrededor de 1g en 20-22 días de cultivo, para luego ser transferidas a piscinas para su etapa de engorde (Cohen et al., 2005). En estos sistemas, la calidad del agua, es uno de los factores determinantes para el éxito del cultivo. Uno de los retos más significativos es el manejo de los compuestos nitrogenados, tales como el amonio, nitrito y nitrato, los cuales se generan a partir de la excreción metabólica del camarón y la descomposición del alimento no consumido (Burford y Williams, 2001). El exceso y la acumulación de estos compuestos nitrogenados pueden provocar efectos tóxicos, afectando la eficiencia alimenticia, el crecimiento y la supervivencia de los organismos (Tabla 2) (Frías-Espéricueta y Páez-Osuna, 2001).

Tabla 2. Principales parámetros ambientales y rangos deseados en cultivo de camarón *Penaeus vannamei*

Parámetro	Mínimo aceptable	Máximo aceptable	Rango deseable (óptimo)	Unidad	Referencias
Temperatura	25	33	28–30	°C	Boyd & Tucker (1998)
Salinidad	5	40	15–25	ppt	Sánchez et al. (2018)
Oxígeno disuelto	3	—	>5 (ideal 5–7)	mg L ⁻¹	Boyd (2001)
pH	7.0	9.0	7.5–8.5	—	Boyd & Tucker (1998)
Alcalinidad	75	250	100–200	mg CaCO ₃ L ⁻¹	Boyd & Tucker (1998)
Dureza	80	400	150–300	mg CaCO ₃ L ⁻¹	Boyd & Tucker (1998)
Amonio total (TAN)	0	1.0	<0.5	mg L ⁻¹	Sánchez et al. (2025)
Amoniaco no ionizado (NH ₃)	0	0.2	<0.05	mg L ⁻¹	Boyd & Tucker (1998)
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0	1.0	<0.5	mg L ⁻¹	Boyd (2001)
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0	50	<10	mg L ⁻¹	Boyd & Tucker (1998)
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	0.05	1.0	0.2–0.5	mg L ⁻¹	
Silicato (SiO ₂)	0.5	10	1–4	mg L ⁻¹	Sánchez et a. (2018)
Transparencia (Disco Secchi)	25	50	30–40	cm	Boyd & Tucker (1998)
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0	0.1	No detectable	mg L ⁻¹	Sánchez et al. (2025)

Mantener una calidad de agua óptima es fundamental para preservar el equilibrio entre los diferentes componentes bióticos y abióticos que conforman los sistemas de cultivo acuícola, incluyendo las comunidades fitoplanctónicas, las poblaciones bacterianas, la materia orgánica y los organismos en cultivo. En este sentido, los sistemas de precría deben entenderse como ecosistemas dinámicos en los que ocurren de manera simultánea e interdependiente procesos físicos, químicos y biológicos que regulan el reciclaje de nutrientes, la productividad primaria y la estabilidad ambiental del cultivo. Por ello, cualquier alteración en alguno de estos componentes puede modificar el equilibrio ecológico del sistema y repercutir directamente en la calidad del agua y en el desempeño productivo de *Penaeus vannamei* (Boyd, 2018; Martínez-Córdova et al., 2015).

6.2.1. Nitrógeno

La principal entrada de nitrógeno al sistema de cultivo proviene de la aplicación de alimento balanceado, representando más del 90% del nitrógeno incorporado al sistema.

Según Hargreaves (1998) se ha estimado que una tasa de alimentación de 100 kg/ha/día con dietas de 32% de proteína puede aportar más de 5 kg de N/ha/día al cultivo.

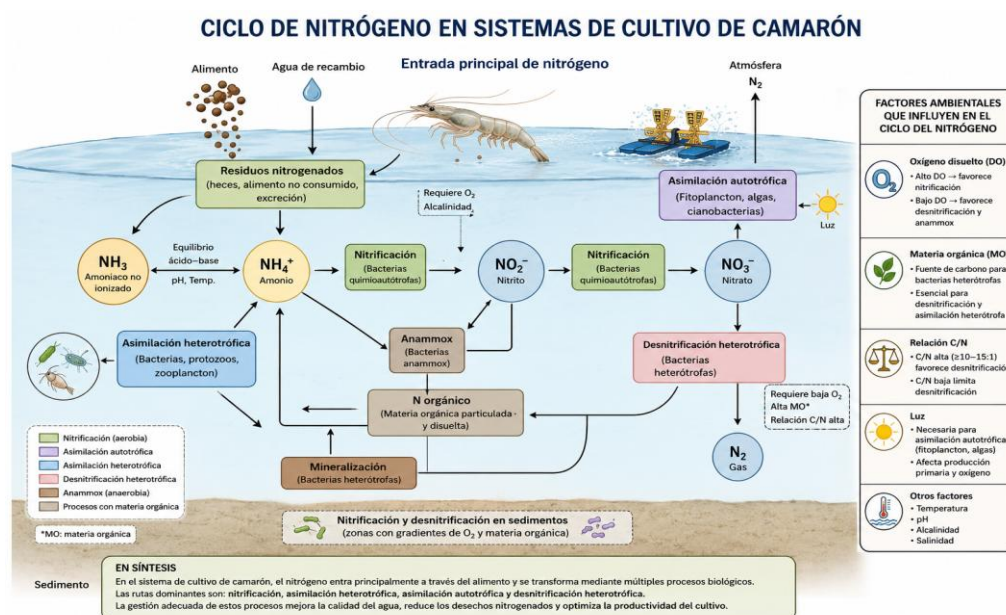


Ilustración 1. Ciclo del nitrógeno en piscinas de producción de camarón. Adaptado de Chen et al., 2024

No obstante, solo una fracción de este nitrógeno es retenida como biomasa en el camarón, mientras que aproximadamente el 80% es liberado al medio en diferentes formas, principalmente como compuestos nitrogenados disueltos que son aprovechados por el fitoplancton y las comunidades microbianas (Fig. 1) (Chen et al., 2024; Moriarty, 1997).

El nitrógeno disuelto se encuentra predominantemente en forma amonio, generado por la excreción metabólica del camarón a través de las branquias. Sin embargo, también hay un aporte de nitrógeno en la descomposición de materia orgánica proveniente de heces y alimento no consumido, contribuyendo de forma indirecta en el aporte de compuestos nitrogenados mediante los procesos de mineralización bacteriana (Burford y Williams, 2001). La acumulación de estos compuestos nitrogenados como amonio, nitrito, nitrato y densidades altas acompañados de poca remoción de agua en estos sistemas generan un impacto negativo en el estado fisiológico del camarón (Burford et al., 2003; Krummenauer, 2011).

6.2.2. Fósforo

En los sistemas de cultivo de camarón, el fósforo constituye un nutriente esencial para el desarrollo del fitoplancton y de las comunidades microbianas, ingresando principalmente al sistema a través del alimento balanceado, cuyo contenido de fósforo no es completamente aprovechado por los camarones. Como resultado, una fracción importante es liberada al agua y al sedimento en forma de alimento no consumido, heces y excreciones, donde experimenta procesos de mineralización que transforman el fósforo orgánico en ortofosfato inorgánico (PO_4^{3-}), la forma más biodisponible para los productores primarios (Xia et al., 2004; Bai et al., 2023).

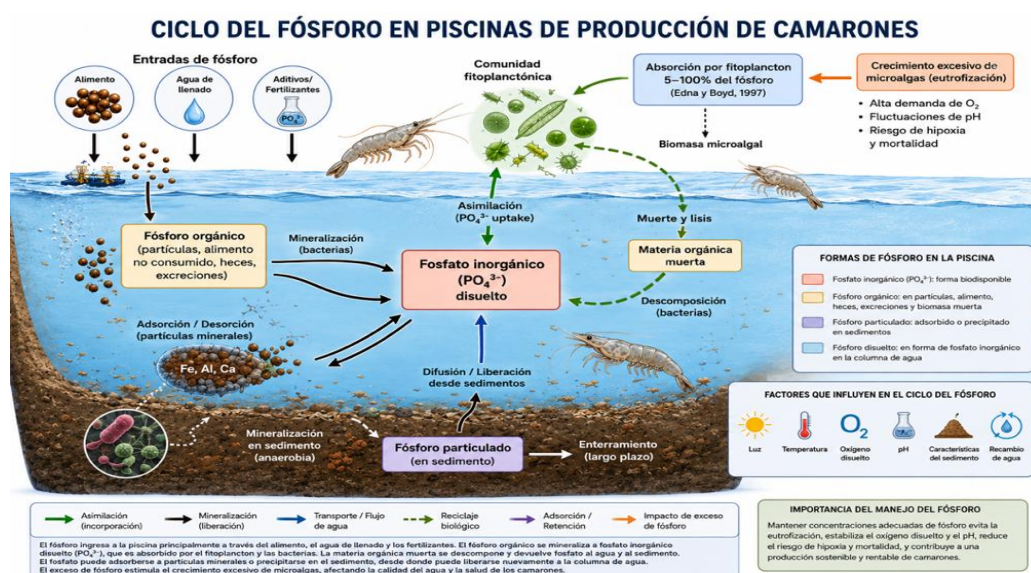


Ilustración 2. Ciclo del fósforo en estanques de producción de camarón. Adaptado de Bai et al. (2023)

El ortofosfato es rápidamente incorporado por el fitoplancton, las microalgas y las bacterias, representando entre el 5 y el 100 % de la absorción total de fósforo por la comunidad fitoplanctónica, dependiendo de la disponibilidad de nutrientes, la intensidad lumínica y las condiciones ambientales (Boyd y Musig (1981). Posteriormente, el fósforo retorna al sistema mediante la muerte y descomposición de los organismos o queda retenido temporalmente en el sedimento por adsorción a partículas minerales, desde donde puede ser nuevamente liberado hacia la columna de agua bajo condiciones de baja concentración de oxígeno o cambios en el potencial redox.

Aunque el fósforo no presenta una toxicidad directa para los camarones, su acumulación favorece la eutrofización del agua al estimular proliferaciones excesivas de microalgas y cianobacterias. Este incremento de la biomasa fitoplanctónica ocasiona elevadas fluctuaciones diarias del oxígeno disuelto y del pH, incrementa la demanda biológica de oxígeno durante la respiración nocturna y la descomposición de la materia orgánica, y puede conducir a episodios de hipoxia o anoxia que comprometen el crecimiento, la supervivencia y la productividad del cultivo. Por ello, el manejo adecuado del fósforo mediante una alimentación eficiente, el control de la carga orgánica, el mantenimiento de una comunidad fitoplanctónica equilibrada y el monitoreo continuo de las concentraciones de fosfato constituye un componente fundamental para preservar la estabilidad biogeoquímica del ecosistema de cultivo y garantizar un ambiente favorable para la producción sostenible de *Penaeus vannamei*.

6.3. Dinámica de fitoplancton en sistemas acuícolas

El fitoplancton son organismos microscópicos y fotosintéticos que desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas acuáticos como productores primarios, constituyendo la base de la cadena trófica. A través de la fotosíntesis, estos organismos convierten la luz solar, el dióxido de carbono y los nutrientes inorgánicos en materia orgánica, favoreciendo estabilidad de oxígeno y al desarrollo de organismos en sistemas acuícolas. (Contreras-Espinosa et al., 2005).

En sistemas de cultivo de camarón, el fitoplancton, en especial las diatomeas tienen una participación clave en la regulación de la calidad del agua mediante la asimilación de nutrientes inorgánicos como nitrógeno y fósforo. No obstante, su impacto positivo depende de la estructura de la comunidad fitoplanctónica, ya que los bloom algales de ciertos grupos como cianobacterias pueden provocar fluctuaciones medioambientales y provocar un desequilibrio en el sistema de producción acuícola. Por ello, la eutrofización, manejo alimenticio y renovación de agua del sistema son factores que pueden alterar la dinámica del fitoplancton, favoreciendo el desarrollo de microalgas indeseables. En resumen, es fundamental mantener un control de las comunidades fitoplanctónica en los sistemas acuícolas ya que proporcionan una mayor estabilidad a la calidad de agua, siendo este un factor crítico para el crecimiento y supervivencia del camarón (Boyd, 2018).

6.4. Diatomeas y su importancia en la Acuicultura

Las diatomeas constituyen uno de los grupos de microalgas más importantes en los ecosistemas acuáticos marinos y de agua dulce, con una amplia distribución tanto en el fitoplancton como en el bento (Armbrust, 2009). Su importancia ecológica radica en su elevada contribución a la productividad primaria, al ciclo biogeoquímico del silicio y a la fijación de dióxido de carbono mediante la fotosíntesis (Falkowski et al., 2004). Durante este proceso, asimilan nutrientes inorgánicos disueltos, principalmente nitrógeno y fósforo, desempeñando un papel esencial en el reciclaje de nutrientes y en el mantenimiento de la calidad del agua. Una característica distintiva de las diatomeas es su dependencia del silicio para el crecimiento (Tabla 3).

Tabla 3. Influencia de las diatomeas en la acuicultura de camarón

Situación reportada	Impacto en el cultivo	Referencias
Dominancia de diatomeas durante las primeras semanas del cultivo	Favorecen el establecimiento de una red trófica equilibrada y mejoran la estabilidad del agua.	Siqueiros-Beltrones & Acevedo-González, (2010).
Mayor supervivencia de postlarvas	Incrementan la supervivencia, el crecimiento inicial y la resistencia al estrés.	Siqueiros-Beltrones et al. (2010). Ferreira-Marinho et al. (2014)
Mejor calidad del agua	Disminuyen las concentraciones de nutrientes disueltos y contribuyen a mantener niveles adecuados de oxígeno durante el día.	Acevedo-González et al. (2010) Ferreira-Marinho et al. (2014)
Competencia con cianobacterias	Reduce la probabilidad de floraciones de cianobacterias, producción de metabolitos indeseables y deterioro de la calidad del agua.	Ferreira-Marinho et al. (2014) Marinho et al. (2017)
Reciclaje de nitrógeno y fósforo	Disminuyen la acumulación de compuestos nitrogenados y fosforados en la columna de agua.	Falkowski et al. (2008); Bai et al. (2023)
Incremento de materia orgánica	Favorece el reciclaje de nutrientes, aunque un exceso puede incrementar la demanda biológica de oxígeno.	Ferreira-Marinho et al. (2014)
Biofloc y comunidades microbianas	Mejoran el reciclaje de nutrientes y la disponibilidad de alimento natural en sistemas intensivos y biofloc.	Hernández-Mancipe et al. (2019)

Aplicación de ácido monosilícico	Puede favorecer una comunidad fitoplanctónica dominada por diatomeas y mejorar la estabilidad ecológica del estanque.	Chang et al. (2022) Emerenciano et al., (2022) Bhattacharjya et al. (2024)
Disponibilidad de alimento natural para organismos zooplanctónicos	Incrementan la disponibilidad de alimento natural, disminuyendo parcialmente la dependencia del alimento balanceado durante las primeras etapas.	Porchas-Cornejo et al. (2011) Porchas-Cornejo et al. (2013).

Las diatomeas incorporan el silicio exclusivamente en su forma biodisponible, el ácido monosilícico (H_4SiO_4 o $\text{Si}(\text{OH})_4$), el cual es polimerizado intracelularmente para formar sílice biogénica amorfa (opalina) que constituye sus frústulas. Estas estructuras proporcionan soporte mecánico, protección frente al estrés ambiental y participan en procesos fisiológicos relacionados con la división celular, la flotabilidad y la supervivencia de las poblaciones (Martin-Jézéquel et al., 2003; Tréguer & De La Rocha, 2013). Durante el ciclo del silicio, las diatomeas regulan la disponibilidad de ácido silícico y contribuyen de manera importante al ciclo biogeoquímico del silicio (Yool & Tyrrell, 2003). Debido a su elevada densidad, las frústulas favorecen además la sedimentación de las células y la agregación de partículas suspendidas, contribuyendo a la clarificación de la columna de agua y al transporte vertical de materia orgánica y nutrientes, procesos fundamentales en el funcionamiento biogeoquímico de los ecosistemas acuáticos (Passow et al., 2003; Yool & Tyrrell, 2003).

En sistemas acuícolas, particularmente durante la fase de precría de *Penaeus vannamei*, el silicio constituye un nutriente estratégico porque regula la capacidad competitiva de las diatomeas dentro de la comunidad fitoplanctónica. Cuando el ácido monosilícico se encuentra disponible en concentraciones adecuadas, las diatomeas incrementan su eficiencia en la captación de nitrógeno y fósforo, favoreciendo su dominancia y limitando el establecimiento de grupos fitoplanctónicos potencialmente perjudiciales, como cianobacterias y algunos dinoflagelados. Este cambio en la estructura de la comunidad no solo incrementa la productividad primaria, sino que también contribuye a mantener una mayor estabilidad ecológica y una mejor calidad del agua.

La disponibilidad de silicio, sin embargo, puede convertirse en un factor limitante en sistemas de cultivo intensivo. Las elevadas densidades de siembra, el incremento de la carga orgánica, la acumulación de nutrientes derivados del alimento no consumido y las limitadas tasas de recambio de agua modifican las relaciones estequiométricas entre silicio, nitrógeno y fósforo, favoreciendo el agotamiento progresivo del silicio disuelto. Como consecuencia, disminuye la competitividad de las diatomeas y se favorece el desarrollo de grupos fitoplanctónicos que no requieren este elemento para su crecimiento, alterando la sucesión natural de la comunidad y aumentando la probabilidad de proliferaciones indeseables (Paasche, 1980; Martin-Jézéquel et al., 2003; Tréguer & De La Rocha, 2013).

La concentración de silicio disuelto también presenta una marcada variabilidad entre ecosistemas acuáticos. Los ambientes marinos generalmente contienen mayores reservas de silicio que los sistemas continentales o de baja salinidad, donde este nutriente puede agotarse con mayor rapidez y limitar el crecimiento de las diatomeas (Conley et al., 1989; Martin-Jézéquel et al., 2000; Yool & Tyrrell, 2003). Bajo estas condiciones, el manejo de la disponibilidad de ácido monosilícico representa una herramienta para mantener el equilibrio de la comunidad fitoplanctónica y favorecer la dominancia de grupos algales funcionalmente más beneficiosos para la acuicultura (Bhattacharjya et al., 2024; Emerenciano et al., 2022).

Las diatomeas desempeñan un papel fundamental en la regulación de la calidad del agua debido a su capacidad para incorporar nitrógeno y fósforo inorgánicos durante su crecimiento, reduciendo la acumulación de compuestos potencialmente tóxicos y contribuyendo al reciclaje de nutrientes dentro del sistema. Simultáneamente, su elevada actividad fotosintética favorece la producción de oxígeno y contribuye a amortiguar las fluctuaciones diarias del pH, procesos esenciales para mantener condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de los organismos cultivados (Falkowski et al., 2008; Bai et al., 2023; Bhattacharjya et al., 2024).

La dinámica de estas comunidades está estrechamente determinada por las relaciones entre nitrógeno, fósforo y silicio (N:P), las cuales regulan la competencia entre los diferentes grupos fitoplanctónicos. Cuando la disponibilidad de silicio es suficiente, las diatomeas utilizan eficientemente el nitrógeno y el fósforo, limitando la disponibilidad de estos nutrientes para otros organismos y desplazando competitivamente a grupos menos deseables

(Chinnasamy et al., 2010; Boyd & Tucker, 1998; Boyd, 2018). Por el contrario, la disminución del silicio disponible favorece la proliferación de cianobacterias y dinoflagelados, organismos capaces de dominar el sistema bajo condiciones de desequilibrio nutricional. Estas proliferaciones suelen asociarse con mayores fluctuaciones del oxígeno disuelto y del pH, acumulación de metabolitos potencialmente tóxicos, deterioro de la calidad del agua y un incremento del estrés fisiológico de los organismos cultivados (Paerl y Otten, 2013; Zhang et al., 2019).

En consecuencia, promover comunidades fitoplanctónicas dominadas por diatomeas constituye una estrategia de manejo ecológico orientada a incrementar la resiliencia de los sistemas de precría de *Penaeus vannamei*. A diferencia de las prácticas enfocadas exclusivamente en corregir parámetros fisicoquímicos individuales, el manejo de la disponibilidad de silicio busca regular los procesos ecológicos que controlan la estructura y el funcionamiento del fitoplancton, favoreciendo una mayor estabilidad del ecosistema, una mejor calidad del agua y condiciones más favorables para el crecimiento y bienestar del camarón

6.5. Ácido monosilícico y crecimiento de diatomeas

El ácido monosilícico o ácido ortosilícico $\text{Si}(\text{OH})_4$ compone la principal forma soluble y biodisponible del silicio en ambientes acuáticos de cultivos, esta forma soluble es aprovechada directamente por las diatomeas, las cuales lo utilizan para la síntesis de sus frústulas silíceas y son indispensable para el crecimiento, división celular y mantenimiento estructural (Martin-Jézéquel et al., 2003; Tréguer & De La Rocha, 2013).

En sistemas acuícolas intensivos, caracterizados por altas densidades, elevada carga orgánica y poca remoción de agua, las concentraciones de ácido monosilícico pueden verse limitadas, debido a la rápida absorción del silicio por las diatomeas y como consecuente un desequilibrio entre silicio, nitrógeno y fósforo, por ello, el uso de fuentes externas de silicio biodisponible representa una estrategia principal para estimular comunidades dominadas por diatomeas y contribuir a una mayor estabilidad de la calidad del agua (Bhattacharjya et al., 2024; Emerenciano et al., 2022).

6.6. Antecedentes investigativos

El uso de microalgas como herramientas de regulación ecológica en sistemas acuícolas ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas, destacando su papel en la asimilación de nutrientes y en la mejora de la calidad del agua. En particular, las diatomeas han sido reconocidas como un grupo funcional relevante debido a su capacidad para incorporar nitrógeno y fósforo, contribuyendo a la estabilización de los sistemas de cultivo (Chinnasamy et al., 2010; Boyd, 2018).

Diversos estudios han evaluado la influencia de materiales ricos en silicio en sistemas acuícolas. Por ejemplo, investigaciones han demostrado que la aplicación de fuentes silíceas como la diatomita en sistemas tipo biofloc puede mejorar parámetros productivos del camarón, incluyendo el crecimiento y la conversión alimenticia, así como favorecer condiciones más estables en la calidad del agua (Martínez-Montaña et al., 2020). Asimismo, revisiones sobre sistemas microbianos en acuicultura han destacado la importancia de la interacción entre microorganismos, nutrientes y fitoplancton en la regulación de la calidad del agua, señalando que el manejo de estos componentes puede optimizar la productividad en cultivos intensivos de camarón (Martínez-Córdova et al., 2015).

En relación con el silicio, estudios enfocados en ambientes acuáticos han establecido que su disponibilidad en forma biodisponible es un factor limitante para el crecimiento de diatomeas, lo que influye directamente en la estructura de la comunidad fitoplanctónica y en los procesos biogeoquímicos del sistema (Tréguer & De La Rocha, 2013). Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones han sido desarrolladas en ambientes naturales o en sistemas controlados distintos a los utilizados en acuicultura intensiva.

A pesar de los avances en el conocimiento sobre el papel del silicio y las diatomeas en ecosistemas acuáticos, existe una limitada cantidad de estudios que evalúen de manera directa la aplicación de ácido monosilícico como fuente biodisponible de silicio en sistemas de precría de *Penaeus vannamei*. En este sentido, la presente investigación busca contribuir al conocimiento existente mediante la evaluación del efecto del ácido monosilícico sobre la dinámica de las diatomeas y su relación con la calidad del agua en sistemas de precría,

abordando un vacío científico relevante y generando información aplicable al sector camaronero.

7. METODOLOGÍA

7.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolló bajo un diseño experimental completamente al azar (DCA), con el propósito de evaluar el efecto de la suplementación con ácido monosilícico sobre el crecimiento de las diatomeas, la estructura de la comunidad fitoplanctónica y la calidad del agua en sistemas de precría de *Penaeus vannamei*. Se establecieron tres tratamientos experimentales: un tratamiento control (T0), sin aplicación de ácido monosilícico; un tratamiento con la dosis recomendada por el fabricante (T1), correspondiente a una aplicación inicial de 3 L/ha y aplicaciones semanales de 2 L/ha; y un tratamiento con una dosis superior a la recomendada (T2), correspondiente a una aplicación inicial de 5 L/ha y aplicaciones semanales de 3 L/ha, distribuidos aleatoriamente en las unidades experimentales para minimizar el efecto de fuentes externas de variación.

Durante todo el período experimental se monitorearon variables biológicas y fisicoquímicas con el fin de evaluar la respuesta del sistema frente a la suplementación con silicio y a la dinámica temporal del cultivo. Las variables biológicas comprendieron la abundancia de diatomeas, clorofitas y cianobacterias, así como la velocidad y la tasa específica de crecimiento de las diatomeas, mientras que las variables fisicoquímicas incluyeron temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, amonio total, amonio tóxico, nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), fosfato (PO_4^{3-}), sílice (SiO_2) y las relaciones estequiométricas entre nitrógeno y fósforo (N:P). La integración de estas variables permitió evaluar el efecto del ácido monosilícico sobre la dinámica del fitoplancton, determinar la relación entre la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de las diatomeas, e identificar los cambios en la calidad del agua asociados con la suplementación.

El estudio se enmarcó en un paradigma positivista con enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo, explicativo y correlacional, ya que permitió caracterizar la evolución

temporal de la comunidad fitoplanctónica y de las condiciones fisicoquímicas del agua, establecer el efecto de los tratamientos mediante análisis estadísticos de comparación y analizar las asociaciones entre las variables biológicas y ambientales.

7.2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

La presente investigación se llevó a cabo en una camaronera Seagate C.l., ubicada en el cantón San Jacinto de Yaguachi, provincia del Guayas, Ecuador, en el sector comprendido entre los recintos Villa Rosa y Achibros. El punto geográfico de referencia del área de estudio se localiza en las coordenadas aproximadamente 2°02'34,6" S y 79°43'48,7"W. El estudio se desarrolló durante la etapa de precría del camarón blanco *Penaeus vannamei* durante un ciclo aproximado de 20 días, bajo condiciones normales de manejo del sistema de cultivo. Cada piscina experimental presentó un área de 10.000 m², con postlarvas promedio 1800.000 y una densidad de 180 PL/m².

7.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

En el presente estudio se realizó un diseño experimental completamente al azar, donde se establecieron tres grupos experimentales: un grupo control sin aplicación del producto (T0), un tratamiento con dosis correspondiente a la recomendada por el fabricante (T1) y un tratamiento con dosis prueba (T2). El esquema de dosificación aplicado contempló una dosis de preparación inicial y una dosis de mantenimiento; el tratamiento T1 comprendió 3 L/ha en preparación y 2 L/ha de mantenimiento semanal, mientras que el tratamiento T2 comprendió 5 L/ha en preparación y 3 L/ha de mantenimiento semanal. Cada tratamiento se efectuó con tres réplicas, para un total de nueve piscinas. Dentro de cada unidad experimental se definieron dos puntos fijos de muestreo: Mesa (Punto 1) y Salida (Punto 2), posteriormente ambos puntos fueron mezclados obteniendo una muestra compuesta por unidad con el propósito de tener una muestra más representativa dentro de cada unidad experimental.

Las aplicaciones del producto se realizaron con una frecuencia semanal y las dosis fueron fraccionadas en dos aplicaciones entre semana con el fin de mantener mayor tiempo la presencia de ácido monosilícico y relacionarlo con la presencia de diatomeas evaluando

su efecto en los procesos de fitobiorremediación.) A continuación, se presenta en la Figura 3 el diseño experimental con sus respectivas dosis.

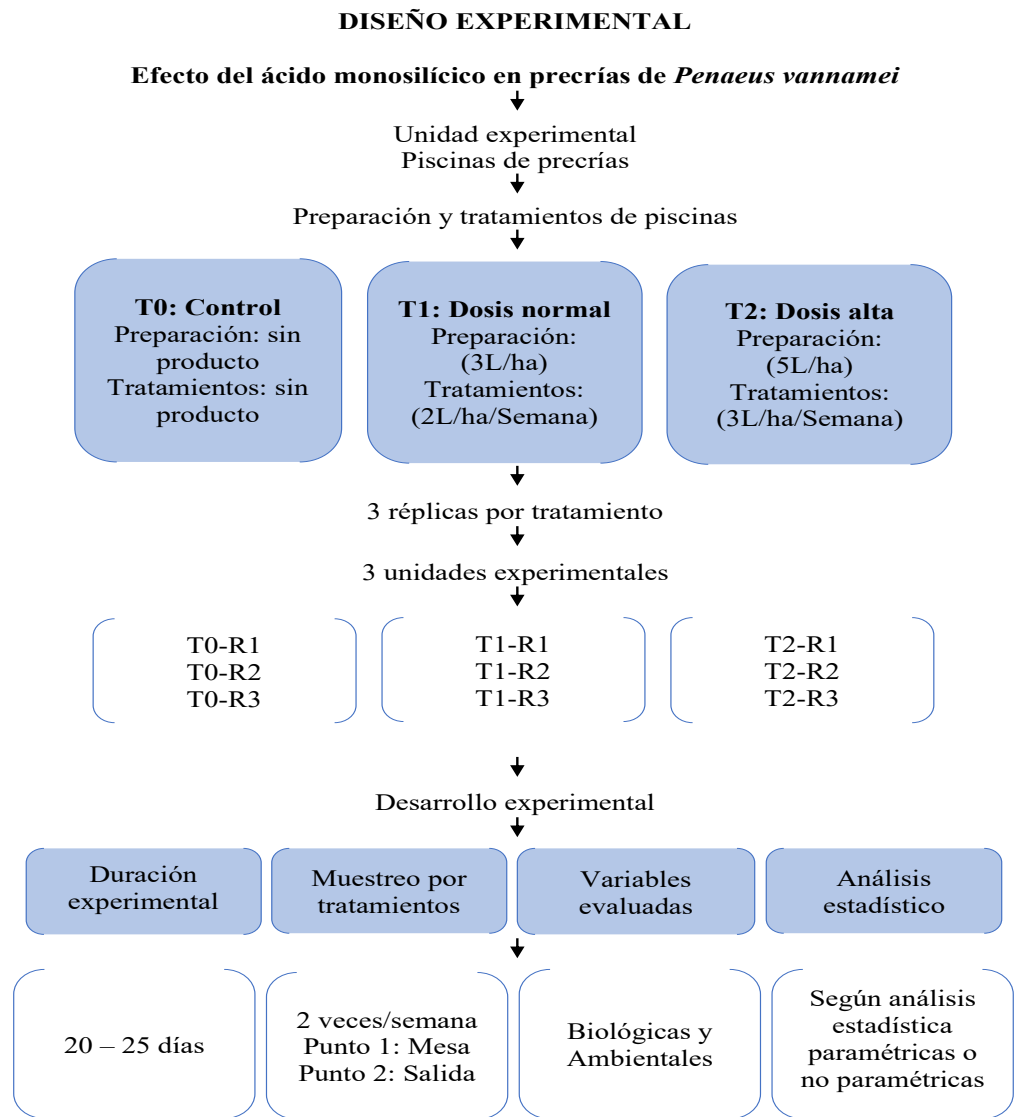


Ilustración 3. Diseño experimental con sus respectivos tratamientos y replicas

7.4.MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales, equipos e insumos utilizados durante el desarrollo de la investigación se organizaron de acuerdo con su función en las actividades de campo, el análisis de la calidad del agua y la cuantificación del fitoplancton, tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Insumos usados durante la presente investigación

Infraestructura y materiales de campo	Materiales para análisis de calidad de agua	Materiales para análisis de fitoplancton
9 piscinas de precría	Espectrofotómetro YSI	Microscopio óptico
Postlarvas de <i>Penaeus vannamei</i>	Reactivo para amonio	Frascos plásticos ámbar para fitoplancton
Producto comercial (ácido monosilícico)	Reactivo para nitrito	Cámara Sedgwick Rafter
Jarra plástica de 1 L	Reactivo para nitrato	Pipetas Pasteur de plástico (1 mL)
Bote o panga	Reactivo para fosfato	Cubreobjetos
Oxímetro	Reactivo para silicio	Solución de Lugol al 1%
Recolector de agua	Botellas plásticas de 200 mL	Contador manual de células
Bitácora de campo	Filtros	Guías taxonómicas de fitoplancton
Marcador permanente	Embudo	Bitácora de fitoplancton
Hielera	Tubos YSI de 10 mL	Computador
	Maceradores	
	Mascarillas	
	Guantes	
	pH-metro	

7.5. PREPARACIÓN DE LAS PISCINAS

Previo al inicio del experimento, las piscinas de precría fueron acondicionadas siguiendo el protocolo operativo establecido por la empresa camaronera, con el propósito de garantizar condiciones homogéneas entre las unidades experimentales y minimizar la influencia de factores externos sobre las variables evaluadas. Inicialmente, se realizó la limpieza y desinfección de las piscinas para eliminar residuos orgánicos, sedimentos y posibles microorganismos patógenos provenientes del ciclo de cultivo anterior, asegurando un ambiente adecuado para el establecimiento de las postlarvas.

Posteriormente, se efectuó la preparación del fondo mediante la aplicación de los productos acondicionadores recomendados por el fabricante y contemplados en el protocolo técnico de la empresa, con el objetivo de mejorar las características fisicoquímicas del suelo, favorecer la mineralización de la materia orgánica y promover condiciones adecuadas para el desarrollo inicial del cultivo. Una vez finalizado este proceso, las piscinas fueron llenadas

con agua proveniente de la fuente de abastecimiento habitual de la camaronera hasta alcanzar el nivel operativo establecido para la fase de precría.

Antes de la siembra, el agua fue sometida a un período de estabilización durante el cual se monitorearon y ajustaron los principales parámetros fisicoquímicos, incluyendo temperatura, pH y salinidad, verificando que estos se encontraran dentro de los rangos recomendados para el cultivo de *Penaeus vannamei*. Esta etapa permitió homogenizar las condiciones ambientales entre todas las unidades experimentales y reducir el estrés asociado a la transferencia de los organismos.

Finalmente, se realizó la siembra de las postlarvas de *Penaeus vannamei*, utilizando organismos de la misma edad y procedencia, los cuales fueron distribuidos a una densidad uniforme en las nueve piscinas experimentales. La homogeneidad en el tamaño inicial de las postlarvas, la densidad de siembra y las condiciones de preparación de las piscinas permitió asegurar que las diferencias observadas durante el experimento estuvieran asociadas principalmente a los tratamientos con ácido monosilícico y no a variaciones en las condiciones iniciales del cultivo.

7.6. Evaluación del ácido monosilícico

El producto utilizado en la presente investigación corresponde a una fuente comercial líquida de silicio biodisponible formulada a base de ácido monosilícico Si(OH)_4 , con una concentración 66.10% complementada con micronutrientes y compuestos orgánicos según especificaciones del fabricante. Este producto se caracteriza por presentar una formulación de asimilación directa para las diatomeas y favorecer su rápida proliferación, debido a estas características fue seleccionado para evaluar su influencia sobre el crecimiento de las diatomeas y calidad de agua de sistemas de precrías.

La dosificación de cada tratamiento (T1 y T2), se aplicó conforme se describe en el esquema del diseño experimental (sección 7.4) contemplando una dosis de preparación inicial y una dosis de mantenimiento semanal. Las dosis aplicadas fueron ajustadas en función el área de cada piscina para mantener la equivalencia en L/ha fijada para cada tratamiento. En ambos tratamientos, las dosis de mantenimiento fueron fraccionada en dos

aplicaciones durante la semana, con el fin de mantener una mayor permanencia del producto en la columna de agua durante el desarrollo experimental. Por su parte, el tratamiento control (T0) fue monitoreado conforme el protocolo de manejo de la camaronera sin recibir aplicación del producto (Ver tabla 2).

Previo a su aplicación el producto fue diluido en agua y distribuido de forma uniforme en la columna de agua de cada piscina, realizando la aplicación en horas de la mañana para favorecer una adecuada dispersión dentro del sistema de cultivo. El detalle de estos procedimientos se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Protocolo de dosificación de los tratamientos

Tratamiento	Dosis de preparación	Dosis de mantenimiento	Réplicas	Frecuencia	Aplicación
T0	Sin aplicación	Sin aplicación	3	Sin aplicación	Sin aplicación
T1	3L/ha	2L/ha (fraccionado en 2)	3	Semanal	Diluir en 200 L de agua
T2	5L/ha	3L/ha (fraccionado en 2)	3	Semanal	Diluir en 200 L de agua

7.7. Monitoreo de variables ambientales del agua

Las muestras fueron recolectadas en horas de la mañana entre 7:00 y 10:00 am, utilizando botellas ámbar de plástico de 1 litro directamente de la columna de agua a una profundidad aproximada de 20 cm. Se monitorearon dos puntos (1 y 2) para obtener una muestra más representativa de cada unidad experimental y posteriormente fueron trasladadas para su análisis en laboratorio. El muestreo se realizó 2 veces por semana durante el ciclo de cultivo con una duración de 20 días aproximadamente, estas muestras de agua fueron utilizadas para realizar conteo de fitoplancton y determinar los parámetros fisicoquímicos del agua mediante análisis químicos según los protocolos utilizados en laboratorio (Ver tabla 6).

Tabla 6. Rutina de muestreo durante la evaluación

Parámetros	Frecuencia	Método de análisis
-------------------	-------------------	---------------------------

Temperatura (°C)	2 veces por semana	Termómetro digital
Oxígeno disuelto (mg/L)	2 veces por semana	Oxímetro portátil
pH	2 veces por semana	pH-metro Hanna
Salinidad (ppt)	2 veces por semana	Refractómetro
Amonio (mg/L)	2 veces por semana	Espectrofotometría
Nitritos/Nitratos (mg/L)	2 veces por semana	Espectrofotometría
Fosfatos (mg/L)	2 veces por semana	Espectrofotometría
Sílice (mg/L)	2 veces por semana	Espectrofotometría

Para el análisis de la calidad de agua, se procedió como primer punto a la toma de parámetros de temperatura, pH y salinidad de cada punto de muestreo por piscina, punto 1 y punto 2, utilizando equipos portátiles previamente calibrados, estos valores fueron promediados para representar cada unidad experimental. Posteriormente se tomaron submuestras de agua homogenizadas de ambos puntos en una misma proporción y se mezclaron obteniendo una muestra compuesta por piscina destinada para el análisis complementario de las variables químicas. Una vez obtenida la submuestra se procedió a filtrar para evaluar nutrientes como amonio, nitrito, nitrato, fosfato y sílice mediante método de espectrofotometría.

7.8. Cuantificación de fitoplancton y parámetros de crecimiento

Para la cuantificación del fitoplancton, se tomaron submuestras previamente homogenizadas de cada punto de monitoreo en igual proporción, las cuales fueron integradas para obtener una muestra compuesta por piscina. Posteriormente, las muestras fueron preservadas con Lugol al 1 % hasta su análisis microscópico.

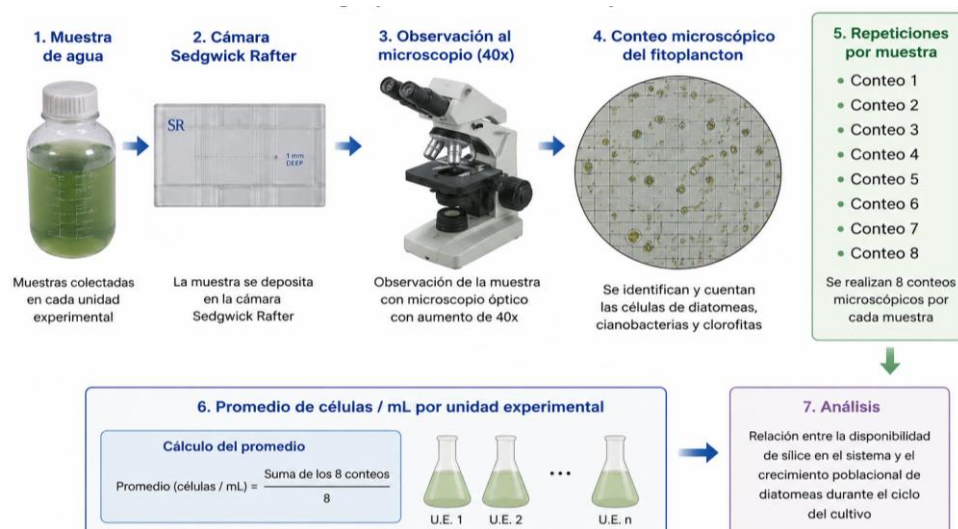


Ilustración 4. Metodología usada para el conteo fitoplanctónico

El conteo del fitoplancton entre ellas diatomeas, cianobacterias y clorofitas se realizó utilizando una cámara Sedgwick-Rafter de 1 mL y un microscopio óptico con aumento de 40×. Se efectuaron ocho conteos microscópicos por muestra en campos seleccionados al azar y el promedio obtenido se expresó como abundancia fitoplanctónica en células por mililitro (cél/mL) para cada unidad experimental. La identificación de los principales grupos fitoplanctónicos se realizó con apoyo de guías taxonómicas especializadas, con énfasis en las diatomeas, con el propósito de evaluar su respuesta frente a la disponibilidad de silicio en el sistema.

A partir de la abundancia de diatomeas registrada en los diferentes tiempos de muestreo se determinaron los parámetros de crecimiento poblacional. La tasa específica de crecimiento celular permite determinar el incremento poblacional de la microalga en función del tiempo de cultivo utilizando la ecuación planteada por Arredondo et al. (2017).

$$\mu = \frac{\ln(N_2/N_1)}{t_2 - t_1}$$

Donde:

μ = tasa específica de crecimiento celular, expresada en día⁻¹.

N_1 = densidad celular inicial, expresada en células mL⁻¹.

N_2 = densidad celular final, expresada en células mL⁻¹.

t_1 = tiempo inicial del cultivo.

t_2 = tiempo final del cultivo.

La velocidad específica de crecimiento expresa el incremento de biomasa en función del tiempo de cultivo Acién-Fernández (2014).

$$\mu = \frac{1}{C} \times \frac{dC}{dt}$$

Donde:

μ = velocidad específica de crecimiento de biomasa, expresada en día⁻¹.

C = concentración de biomasa en el cultivo.

dC = variación de la concentración de biomasa.

dt = variación del tiempo.

dC/dt = cambio de la biomasa con respecto al tiempo.

7.9. Análisis estadístico

Previamente al análisis estadístico, se realizó un análisis exploratorio a las variables biológicas y ambientales con el fin de identificar valores atípicos y verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk. (Fig. 9)

Para evaluar el efecto de la aplicación de ácido monosilícico sobre la respuesta biológica y la calidad del agua, se empleó un análisis de varianza (ANOVA), considerando como factor

los tratamientos experimentales (Control, T1 y T2). Este análisis se aplicó a las variables de abundancia de diatomeas, velocidad específica de crecimiento, tasa de crecimiento poblacional, concentración de nutrientes inorgánicos (amonio total, amoníaco tóxico, nitrito, nitrato, fosfato y silicio disuelto) y parámetros fisicoquímicos del agua (temperatura, oxígeno disuelto, pH y salinidad). Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (HSD) para identificar los tratamientos que difirieron entre sí. Estos análisis fueron realizados en STATISTICA versión 7.0.

La prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis se empleó para comparar las diferencias entre los tratamientos debido a que algunas variables evaluadas no cumplieron los supuestos de normalidad y/o homogeneidad de varianzas requeridos para un análisis de varianza (ANOVA), utilizando el programa InfoStat versión 2020.

Con el fin de evaluar la relación entre las variables biológicas, químicas y fisicoquímicas, se realizó un análisis de correlación utilizando el coeficiente de Pearson (r) mediante STATISTICA versión 7.0, cuando las variables presentaron distribución normal y una relación lineal. Las correlaciones se efectuaron entre la abundancia de diatomeas y los parámetros de calidad del agua. La magnitud de las correlaciones se interpretó de acuerdo con el valor absoluto del coeficiente de correlación, considerando asociaciones débiles (< 0.30), moderadas ($0.30\text{--}0.69$) y fuertes (≥ 0.70), con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Finalmente, para explorar los patrones de variación conjunta entre los nutrientes, las variables fisicoquímicas y la respuesta biológica de las diatomeas, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Este análisis permitió identificar los principales gradientes ambientales responsables de la variabilidad del sistema y determinar la contribución relativa del ácido monosilícico y de la dinámica temporal sobre la abundancia y el crecimiento de las diatomeas.

8. RESULTADOS

8.1. Abundancia de diatomeas

La abundancia de diatomeas presentó una marcada variación temporal en los tres tratamientos durante el periodo experimental (Fig. 5). Al inicio del experimento (día 0) no se observaron diferencias evidentes entre los tratamientos, registrándose abundancias cercanas a 123.000 y 142.000 cel/mL. Durante los primeros tres días, los tratamientos con ácido monosilícico mostraron un incremento pronunciado, particularmente T1, que alcanzó el valor más alto del ensayo 180.900 cel/mL, seguido de T2 con 166.500 cel/mL mientras que el tratamiento Control mantuvo una abundancia relativamente estable 145.000 cel/mL.

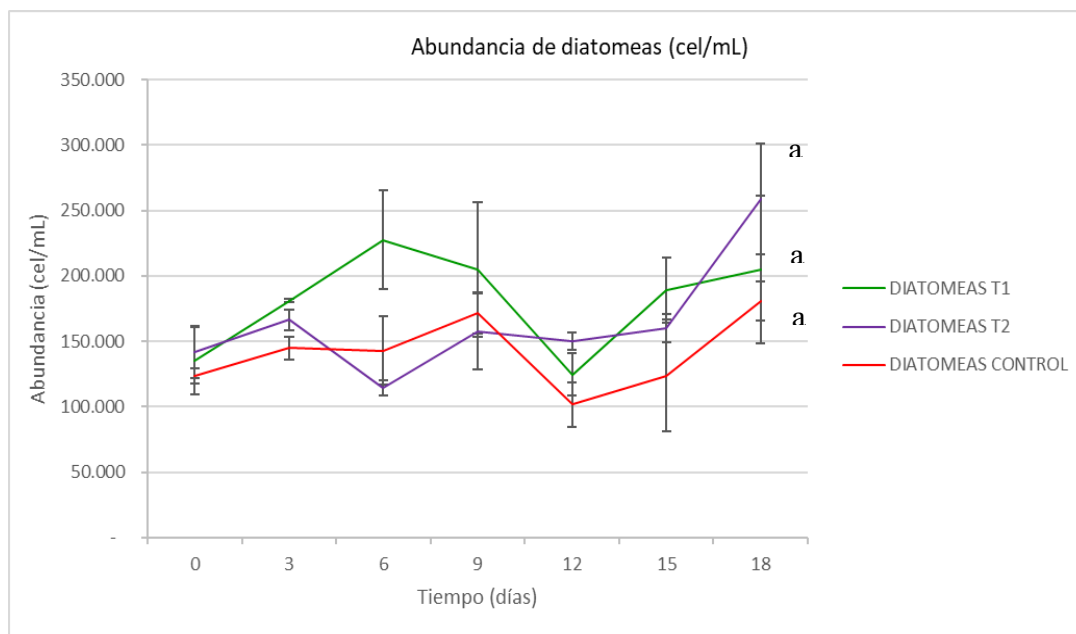


Ilustración 5. Resultados de la abundancia de diatomeas

Posteriormente, entre los días 6 y 9 se evidenciaron comportamientos diferentes entre los tratamientos suplementados. T1 continuó aumentando y T2 disminuyó su abundancia, siendo T1 el que alcanzó el primer pico de abundancia 227.500 cel/mL, superior al observado en el T2 157.500 cel/mL y Control 172.000 cel/mL. En el día 12 se registró una disminución en todos los tratamientos, más acentuada en T2, cuya abundancia descendió hasta 150,000 cel/mL, mientras que T1 y el Control mantuvieron valores cercanos a 125.000 y 102.000 cel/mL, respectivamente. A partir del día 15 la abundancia volvió a incrementarse, observándose al final del experimento (día 18) el mayor valor en T2 260.000 cel/mL, seguido por T1 205.000 cel/mL y el Control 180.000 cel/mL.

El análisis de varianza (ANOVA) la abundancia final de diatomeas no mostró diferencias entre los tres tratamientos evaluados ($p \geq 0.05$) (Figura 5). No obstante, se observaron diferencias numéricas entre las medias. El Tratamiento 2 (T2) presentó la mayor abundancia final, alcanzando aproximadamente 258.750 cel/mL, seguido por el Tratamiento 1 (T1) con alrededor de 204.583 cel/mL, mientras que el Control (T0) registró la menor abundancia, con un promedio cercano a 180.417 cel/mL sin diferencias estadísticas significativas.

Las barras de error evidencian una mayor variabilidad en T1 y T2 respecto al Control, particularmente en T1, lo que refleja una respuesta menos homogénea entre las unidades experimentales. A pesar de esta variabilidad, la diferencia en las medias sugiere un efecto favorable del ácido monosilícico sobre la proliferación de diatomeas al final del período experimental.

8.2. Velocidad y tasa de crecimiento

La velocidad específica de crecimiento y la tasa de crecimiento de las diatomeas mostraron una tendencia creciente en los tratamientos suplementados con ácido monosilícico en comparación con el tratamiento Control (Tabla 7). El Tratamiento 1 (T1) registró los valores promedio más altos para ambas variables, alcanzando una velocidad de crecimiento de $0,099 \pm 0,062 \text{ día}^{-1}$ y una tasa de crecimiento de $0,888 \pm 0,613$, seguido por T2, con $0,079 \pm 0,028 \text{ día}^{-1}$ y $0,621 \pm 0,283$, respectivamente. Por su parte, el Control presentó los menores valores, con una velocidad de crecimiento de $0,063 \pm 0,011 \text{ día}^{-1}$ y una tasa de crecimiento de $0,463 \pm 0,094$. Sin embargo, el análisis de varianza (ANOVA) no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

En conjunto, los resultados indican que la aplicación de ácido monosilícico favoreció una mayor velocidad de crecimiento y una mayor tasa de incremento poblacional de las diatomeas; sin embargo, bajo las condiciones experimentales evaluadas, este efecto constituyó una tendencia biológica más que una diferencia estadísticamente significativa.

Tabla 7. Comparación de velocidad y tasa de crecimiento de diatomeas entre los tratamientos

Tratamientos	Velocidad de crecimiento	Tasa de crecimiento
T1	$0,099 \pm 0,062^a$	$0,888 \pm 0,613^a$
T2	$0,079 \pm 0,028^a$	$0,621 \pm 0,283^a$
Control	$0,063 \pm 0,011^a$	$0,463 \pm 0,094^a$

8.3. Composición relativa del fitoplancton

La composición de la comunidad fitoplanctónica presentó cambios importantes durante el período experimental, evidenciando una sustitución progresiva de las cianofitas por diatomeas y clorofitas en todos los tratamientos (Tabla 8). Los tratamientos suplementados con ácido monosilícico mostraron el mayor incremento en la proporción de diatomeas. En T2, las diatomeas aumentaron del 24 % al 48 % (+24 puntos porcentuales), seguido de T1, donde pasaron del 28 % al 43 % (+15 puntos porcentuales). En contraste, el tratamiento Control registró un incremento mucho menor, del 24 % al 27 % (+3 puntos porcentuales), indicando una respuesta limitada en ausencia de la suplementación con silicio.

Las clorofitas también incrementaron su representación relativa en los tres tratamientos. El mayor aumento se observó en el Control, donde pasaron del 5 % al 42 % (+37 puntos porcentuales), seguido de T2 (8 % a 37 %; +29 puntos porcentuales) y T1 (6 % a 32 %; +26 puntos porcentuales). Este comportamiento sugiere que, aunque la disponibilidad de silicio favoreció el desarrollo de las diatomeas, las clorofitas también aprovecharon las condiciones ambientales del cultivo, particularmente en el tratamiento sin adición de ácido monosilícico, donde ocuparon el nicho ecológico dejado por la disminución de las cianofitas.

Tabla 8. Variación porcentual de los principales grupos fitoplanctónicos

Tratamiento	Diatomeas (%)	Clorofitas (%)	Cianofitas (%)
T1	28 → 43 (+15)	6 → 32 (+26)	65 → 24 (-41)
T2	24 → 48 (+24)	8 → 35 (+27)	68 → 17 (-51)
Control	24 → 27 (+3)	5 → 42 (+37)	71 → 31 (-40)

Por otra parte, las cianofitas disminuyeron considerablemente en todos los tratamientos, siendo esta reducción más pronunciada en T2, donde su abundancia relativa descendió del 68 % al 17 % (-51 puntos porcentuales). En T1, la disminución fue de 65 % a 24 % (-41 puntos porcentuales), mientras que en el Control pasó de 71 % a 31 % (-40 puntos porcentuales) (Fig. 6). La mayor reducción observada en T2 coincide con el tratamiento que

presentó la mayor proporción final de diatomeas, lo que sugiere un desplazamiento de las cianofitas asociado al incremento de diatomeas favorecido por la disponibilidad de silicio.

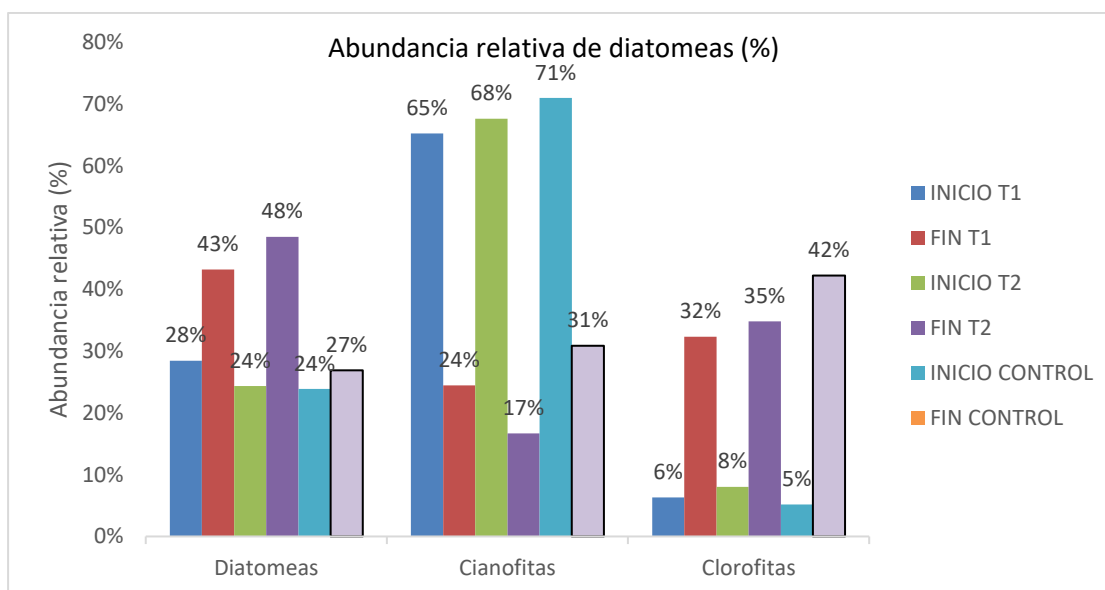


Ilustración 6. Cambios en la abundancia relativa (%) de diatomeas, cianofitas y clorofias

8.4.Composición final del fitoplancton

La composición final de la comunidad fitoplanctónica evidenció diferencias entre los tratamientos evaluados (Fig. 7), reflejando un efecto de la suplementación con ácido monosilícico sobre la estructura de la comunidad. El Tratamiento 2 (T2) presentó la mayor proporción de diatomeas, alcanzando aproximadamente el 48 % de la comunidad fitoplanctónica, seguido por T1 con 43 %, mientras que el Control registró únicamente 27 %. Estos resultados indican que la incorporación de ácido monosilícico favoreció el establecimiento y la dominancia relativa de las diatomeas, especialmente en T2.

Las clorofitas representaron el segundo grupo fitoplanctónico más abundante. El Control presentó la mayor proporción (42 %), seguido por T2 (35 %) y T1 (32 %). La mayor abundancia de este grupo en ausencia de suplementación con silicio sugiere que, cuando la disponibilidad de este nutriente es limitada, las clorofitas incrementan su participación relativa dentro de la comunidad fitoplanctónica, ocupando parte del nicho ecológico disponible.

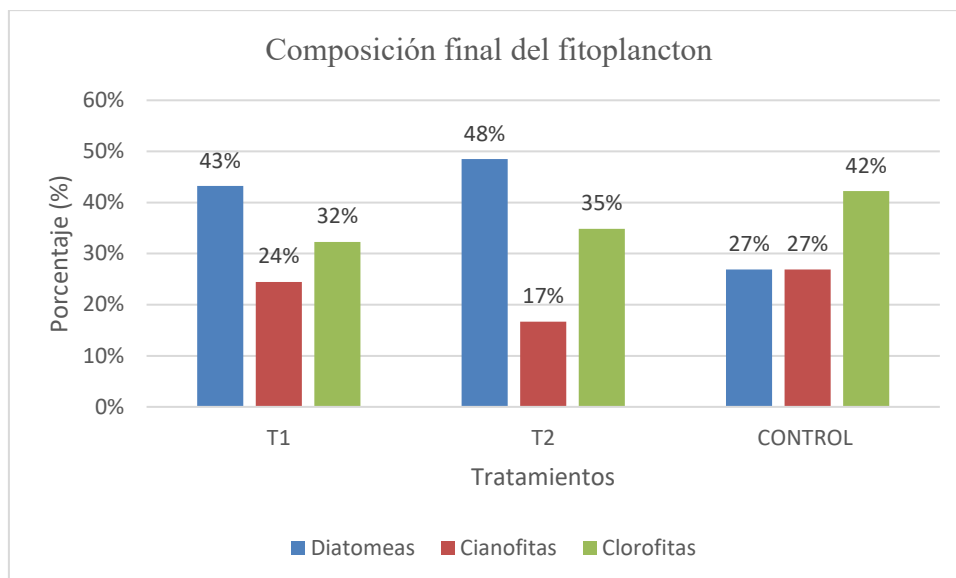


Ilustración 7. Composición final del fitoplancton de acuerdo al tratamiento usado

Por el contrario, las cianofitas fueron el grupo menos representado al finalizar el experimento en los tratamientos con ácido monosilícico. El menor porcentaje se observó en T2 (17 %), seguido de T1 (24 %), mientras que el Control presentó la mayor proporción (31 %). Esta disminución de las cianofitas en los tratamientos suplementados coincide con el incremento de las diatomeas, sugiriendo un proceso de sustitución dentro de la comunidad fitoplanctónica asociado a una mayor disponibilidad de silicio.

8.5. Variaciones de parámetros fisicoquímicos

El análisis de Kruskal–Wallis evidenció que la mayoría de las variables de calidad de agua no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($P > 0,05$), incluyendo amonio total (AT), amoníaco tóxico (NH_3), nitrito (NO_2), nitrato (NO_3), fosfato (PO_4), pH y temperatura. En contraste, la relación N:P ($H = 10,84$; $P = 0,0044$), la concentración de SiO_2 ($H = 6,38$; $P = 0,0410$) y el oxígeno disuelto ($H = 12,29$; $P = 0,0021$) mostraron diferencias significativas (Tabla 9). En particular, T2 presentó una menor relación N:P y menores concentraciones de SiO_2 respecto al control, mientras que T1 y T2 registraron concentraciones de oxígeno disuelto significativamente superiores al control, lo que sugiere que la adición de ácido monosilícico modificó principalmente la disponibilidad de silicio, el balance de nutrientes y la oxigenación del sistema, sin alterar el resto de los parámetros fisicoquímicos.

Tabla 9. Análisis estadístico Kruskal Wallis

Variables	Control (Medianas $\pm$ DE)	T1 (Medianas $\pm$ DE)	T2 (Medianas $\pm$ DE)	H	P
AT (mg/L)	0,86 $\pm$ 0,37 ^a	0,84 $\pm$ 0,68 ^a	1,10 $\pm$ 0,43 ^a	1,89	0,3874
NH ₃ Tóxico (mg/L)	0,05 $\pm$ 0,06 ^a	0,05 $\pm$ 0,09 ^a	0,08 $\pm$ 0,06 ^a	0,56	0,7508
NO ₂ (mg/L)	0,15 $\pm$ 0,12 ^a	0,15 $\pm$ 0,08 ^a	0,17 $\pm$ 0,09 ^a	0,72	0,6961
NO ₃ (mg/L)	0,62 $\pm$ 0,09 ^a	0,56 $\pm$ 0,14 ^a	0,59 $\pm$ 0,13 ^a	1,09	0,5796
PO ₄ (mg/L)	0,61 $\pm$ 0,19 ^a	0,60 $\pm$ 0,41 ^a	0,88 $\pm$ 0,32 ^a	2,94	0,2292
N:P	10,16 $\pm$ 1,69 ^a	8,69 $\pm$ 2,10 ^{ab}	6,12 $\pm$ 1,65 ^b	10,84	0,0044
SiO ₂ (mg/L)	17,57 $\pm$ 0,57 ^a	12,86 $\pm$ 3,95 ^{ab}	12,57 $\pm$ 4,18 ^b	6,38	0,0410
Oxígeno	1,73 $\pm$ 0,35 ^a	2,70 $\pm$ 0,27 ^b	2,63 $\pm$ 0,36 ^b	12,29	0,0021
pH	8,36 $\pm$ 0,41 ^a	7,95 $\pm$ 0,38 ^a	8,07 $\pm$ 0,20 ^a	0,51	0,7760
Temperatura	25,10 $\pm$ 1,98 ^a	25,88 $\pm$ 1,98 ^a	25,58 $\pm$ 1,94 ^a	0,68	0,7134

8.6. Correlación entre la abundancia de diatomeas y los parámetros físicoquímicos del agua

El análisis de correlación evidenció que la respuesta de las diatomeas frente a las variables ambientales difirió entre tratamientos. En el tratamiento Control no se observaron correlaciones fuertes, predominando asociaciones débiles a moderadas ($|r| < 0,50$), lo que sugiere que el desarrollo de las diatomeas estuvo regulado por la interacción de múltiples factores ambientales. En T1 destacó una correlación negativa muy fuerte entre las diatomeas y la concentración de SiO₂ ($r = -0,9294$; $P < 0,01$), indicando un intenso consumo de silicio disuelto conforme aumentó la abundancia de este grupo fitoplanctónico. Además, se registraron correlaciones negativas moderadas con la relación N:P ($r = -0,6336$), el amonio total, el amoníaco tóxico y el fosfato, lo que sugiere un mayor aprovechamiento de los nutrientes durante el crecimiento de las diatomeas. En T2, aunque la correlación con SiO₂ fue también negativa ($r = -0,5354$), su magnitud fue menor, mientras que se observaron asociaciones positivas moderadas a fuertes con el oxígeno disuelto ($r = 0,7428$), el pH ($r = 0,7345$), el nitrito ($r = 0,6048$) y el nitrato ($r = 0,6037$), reflejando una mayor actividad fotosintética y una estrecha relación entre el incremento de las diatomeas y la dinámica del nitrógeno oxidado (Tabla 10)

Tabla 10. Coeficiente de correlación Pearson (r) entre la abundancia de diatomeas y parámetros fisicoquímicos.

Parámetros	Control (r)	T1 (r)	T2 (r)
AT mg/L	-0,3652	-0,4461	-0,4443
NH ₃ Tóxico (mg/L)	-0,0485	-0,463	-0,0541
NO ₂ (mg/L)	0,3643	0,0273	0,6048
NO ₃ (mg/L)	-0,2912	0,1631	0,6037
PO ₄ (mg/L)	-0,3653	-0,4547	-0,4777
Relación N:P	0,4256	-0,6336	0,0457
SiO ₂ (mg/L)	0,4014	-0,9294**	-0,5354
Oxígeno	0,3133	0,2032	0,7428
pH	0,4626	0,1085	0,7345
Temperatura	0,2628	-0,1313	-0,5717

8.7. Análisis de componentes principales

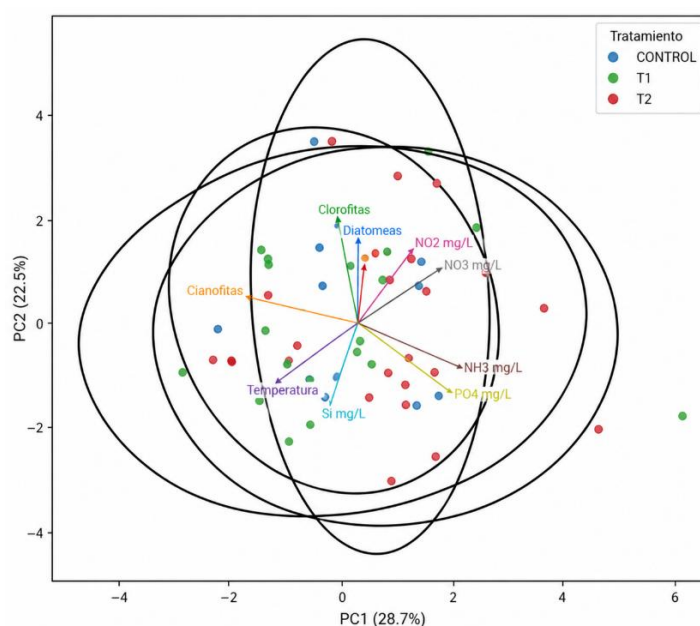


Ilustración 8. Análisis de componentes principales (PCA) de las variables fisicoquímicas y de la comunidad fitoplanctónica en los tratamientos Control, T1 y T2. Las flechas representan la contribución de las variables al ordenamiento, mientras que las elipses indican la dispersión de las muestras para cada tratamiento.

El análisis de componentes principales (PCA) explicó el 51,2 % de la variabilidad total de los datos, donde el PC1 y el PC2 representaron el 28,7 % y 22,5 %, respectivamente. La distribución de las muestras mostró un amplio solapamiento entre el Control, T1 y T2,

sin una separación clara entre tratamientos, lo que indica que la aplicación de ácido monosilícico no produjo una diferenciación marcada en la estructura global de las variables ambientales durante el periodo de evaluación.

En el biplot, el PC1 estuvo asociado positivamente con las concentraciones de NO_2^- , NO_3^- , NH_3 y PO_4^{3-} , mientras que en el extremo negativo se ubicaron SiO_2 , temperatura y cianofitas, reflejando un gradiente relacionado con la disponibilidad de nutrientes y la composición fitoplanctónica. Por su parte, el PC2 estuvo influenciado principalmente por las diatomeas, clorofitas y el pH, variables orientadas hacia valores positivos del eje, lo que sugiere una asociación entre la dominancia de estos grupos algales.

Aunque las elipses de dispersión evidenciaron una elevada variabilidad intratratamiento, las muestras de T2 tendieron a distribuirse hacia valores positivos del PC1, asociándose con mayores concentraciones de nutrientes nitrogenados y fósforo, mientras que T1 presentó una ligera tendencia hacia el sector negativo del PC1, donde se relacionó con una mayor disponibilidad de silicio. En conjunto, el PCA indica que la variación temporal y la dinámica natural del sistema explicaron una mayor proporción de la variabilidad ambiental que el efecto del tratamiento, mientras que la adición de ácido monosilícico generó cambios puntuales en la disponibilidad de silicio y en la respuesta de la comunidad fitoplanctónica, sin modificar sustancialmente la estructura multivariada del sistema.

9. DISCUSIÓN

La suplementación con ácido monosilícico modificó la estructura de la comunidad fitoplanctónica de las precrías de *Penaeus vannamei*, aunque este efecto no se reflejó en diferencias estadísticamente significativas en la abundancia absoluta de diatomeas entre tratamientos. Este resultado evidencia que la disponibilidad de silicio no necesariamente induce incrementos inmediatos en la biomasa de este grupo, sino que influye principalmente sobre su competitividad ecológica y estabilidad poblacional. En este estudio, las mayores tendencias en velocidad y tasa de crecimiento observadas en T1 y, en menor medida, en T2, indican que el ácido monosilícico promovió una respuesta fisiológica favorable durante las etapas iniciales del crecimiento de las diatomeas, sin traducirse en una mayor biomasa

acumulada al finalizar el ensayo. Esta respuesta coincide con Makareviciute-Fichtner et al. (2020), quienes demostraron que la relación Si:N constituye un factor determinante para prolongar la persistencia de las poblaciones de diatomeas, retrasando la limitación por silicio y favoreciendo la estabilidad de la comunidad fitoplanctónica más que incrementos inmediatos de biomasa.

La ausencia de diferencias significativas en la abundancia de diatomeas puede atribuirse, además, a la elevada variabilidad observada entre las unidades experimentales, particularmente en T1, donde la desviación estándar representó una proporción importante del promedio. Esta heterogeneidad redujo el poder estadístico para detectar diferencias entre tratamientos, aun cuando las tendencias biológicas fueron consistentes. En sistemas acuáticos complejos, la respuesta del fitoplancton depende simultáneamente de múltiples procesos ecológicos (Boyd, 2002), incluyendo competencia por nutrientes, sucesión de especies, reciclaje microbiano y presión de pastoreo, factores que incrementan la variabilidad inherente de este tipo de experimentos.

Durante el ensayo, la participación de las diatomeas aumentó de aproximadamente 24–28 % hasta 43–48 %, mientras que las cianobacterias disminuyeron de 65–71 % a 17–31 %, acompañadas por un incremento paralelo de las clorofitas. Este patrón refleja un desplazamiento de la comunidad hacia grupos fitoplanctónicos considerados ecológica y nutricionalmente más favorables para los sistemas de producción de camarón. Criterio que es ampliamente comparado en investigaciones preliminares (Llario et al., 2019; Fernandes et al., 2019; Abdelhay et al., 2025). Particularmente, Yusoff et al. (2002), observaron que en cultivos intensivos de camarón sin suplementación de sílice las diatomeas fueron progresivamente desplazadas por cianobacterias como consecuencia de la eutrofización y del agotamiento relativo del silicio disponible. La importancia de este resultado radica en que la estructura de la comunidad fitoplanctónica suele representar un mejor indicador del funcionamiento ecológico del sistema que la biomasa total de un único grupo algal, debido a que determina las interacciones tróficas, la eficiencia en el reciclaje de nutrientes y la estabilidad de la calidad del agua.

Bioensayos controlados, demostraron que la adición de sílice incrementó significativamente la tasa específica de crecimiento de *Chaetoceros calcitrans* e inhibió el

desarrollo de *Oscillatoria* sp., evidenciando que el silicio modifica la capacidad competitiva entre grupos fitoplanctónicos (Bastos et al., 2022). La tendencia observada en el presente estudio reproduce este comportamiento ecológico, indicando que el ácido monosilícico favorece indirectamente la dominancia de diatomeas al mejorar su capacidad competitiva frente a grupos oportunistas como las cianobacterias.

Desde la perspectiva del manejo acuícola, este cambio adquiere especial relevancia debido a que las diatomeas representan uno de los componentes más valiosos del fitoplancton en sistemas de cultivo. Su elevado contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente EPA, su alta digestibilidad y su eficiente contribución a la productividad primaria las convierten en una fuente alimenticia de mayor calidad para los estadios tempranos del camarón (Bhattacharjya et al., 2024; Ashour et al., 2025). Adicionalmente, las diatomeas presentan menores riesgos de generar metabolitos tóxicos, consumo excesivo de oxígeno durante procesos de descomposición o proliferaciones nocivas, situaciones frecuentemente asociadas al predominio de cianobacterias (Datta et al., 2019; Di Costanzo et al., 2023). En consecuencia, aun en ausencia de diferencias significativas en abundancia absoluta, el incremento relativo de las diatomeas constituye un resultado biológicamente favorable que puede contribuir a mejorar la estabilidad ecológica de los sistemas de precría.

Entre todas las variables fisicoquímicas evaluadas, únicamente la relación N:P, la concentración de SiO₂ y el oxígeno disuelto presentaron diferencias significativas entre tratamientos, indicando que la suplementación con ácido monosilícico actuó principalmente modificando el equilibrio nutricional del sistema y no alterando las concentraciones absolutas de nitrógeno o fósforo. Este resultado respalda el concepto ecológico de que el crecimiento fitoplanctónico depende más de la proporción relativa entre nutrientes que de sus concentraciones individuales (Hecky & Kilham, 1988), principio ampliamente descrito para sistemas acuáticos donde las relaciones Si:N:P regulan la competencia entre diatomeas y otros grupos algales (Makareviciute-Fichtner et al., 2020). Los resultados del análisis de Kruskal–Wallis indican que la aplicación de ácido monosilícico produjo cambios específicos en la dinámica del sistema, más que una modificación general de la calidad del agua. La ausencia de diferencias significativas en AT, NH₃, NO₂, NO₃, PO₄, pH y temperatura demuestra que el tratamiento no afectó los procesos fundamentales de mineralización del nitrógeno ni las condiciones fisicoquímicas del cultivo. En contraste, la disminución

significativa de la relación N y de la concentración de SiO_2 , junto con el incremento del oxígeno disuelto en T1 y T2, sugiere una mayor utilización del silicio por la comunidad fitoplanctónica, especialmente por las diatomeas. Estos resultados respaldan que el efecto del ácido monosilícico se manifestó principalmente sobre los procesos biológicos asociados a la productividad fitoplanctónica y no sobre la química básica del agua.

La reducción de la relación N:P observada en T2 respecto al Control sugiere un mayor consumo relativo de nitrógeno durante el desarrollo de la comunidad fitoplanctónica. Paralelamente, el incremento significativo del oxígeno disuelto en los tratamientos suplementados indica una mayor actividad fotosintética, consistente con el establecimiento de una comunidad dominada por microalgas de mayor eficiencia fotosintética. Aunque el oxígeno disuelto constituye un parámetro indirecto, su incremento respalda la hipótesis de que el ácido monosilícico promovió condiciones más favorables para el metabolismo fotosintético del fitoplancton.

Las tendencias observadas en los análisis de correlación complementan esta interpretación fisiológica. En T1 se registró una asociación negativa muy fuerte entre la abundancia de diatomeas y la concentración de Silicio indicando una tendencia consistente con el consumo biológico de silicio durante la formación del frústulo. Este comportamiento es coherente con la fisiología conocida de las diatomeas, cuya división celular requiere la incorporación continua de ácido silícico para la síntesis de sus paredes celulares (Volcani, 1978). Mientras el análisis de componentes principales demostró que la tendencia de T1 y T2 a asociarse con el gradiente de silicio y nutrientes sugiere que la adición de ácido monosilícico ejerció un efecto específico sobre la disponibilidad de Si y la respuesta del fitoplancton, particularmente de las diatomeas, sin modificar de manera significativa la estructura fisicoquímica global del sistema. Esto indica que el silicio actuó como un modulador de procesos biológicos más que como un factor capaz de alterar las condiciones ambientales generales de las piscinas.

Sin embargo, diversos estudios han demostrado que las diatomeas poseen una elevada plasticidad fisiológica frente a condiciones de disponibilidad variable de silicio. McNair et al. (2018) demostraron que, bajo condiciones de disminución del silicio disuelto, las poblaciones de diatomeas reducen el contenido de sílice incorporado al frústulo,

permitiendo mantener el crecimiento y retrasar la limitación por este nutriente, mientras que Raven y Waite (2004) señalaron que una menor silicificación disminuye la densidad celular y reduce la velocidad de sedimentación, permitiendo que las células permanezcan durante más tiempo en la zona fótica y mantengan una elevada actividad fotosintética. Estos mecanismos fisiológicos explican por qué la respuesta observada en este estudio no necesariamente se manifestó como un incremento proporcional en la biomasa, sino como una mejora en la persistencia y dinámica poblacional de las diatomeas.

Una tendencia similar se observó entre la abundancia de diatomeas y la concentración de fosfato en T2 sugiriendo un mayor consumo biológico de fósforo conforme aumentó la participación relativa de este grupo. El fósforo constituye un nutriente esencial para la síntesis de ATP, ácidos nucleicos y fosfolípidos de membrana (Malhotra et al., 2018; Canfield et al., 2005), por lo que su utilización aumenta durante los procesos de crecimiento celular. Lovio-Fragoso et al. (2021) demostraron que las diatomeas activan mecanismos altamente eficientes de captación y reciclaje de fósforo bajo condiciones limitantes, mientras que, Feng et al. (2015) describieron procesos metabólicos adicionales, como el reciclaje intracelular de fósforo, el reemplazo de fosfolípidos por lípidos no fosforados y la utilización de fuentes orgánicas. Aunque la correlación observada no alcanzó significancia estadística, estos mecanismos fisiológicos respaldan la tendencia registrada y evidenciarían la elevada capacidad adaptativa de las diatomeas frente a fluctuaciones en la disponibilidad de nutrientes. Aunque las concentraciones de PO_4^{3-} no difirieron significativamente entre tratamientos (Kruskal–Wallis, $P > 0,05$), las correlaciones negativas observadas entre las diatomeas y el fosfato, especialmente en T1 y T2, sugieren un mayor consumo de este nutriente durante el desarrollo fitoplanctónico. Sin embargo, el PCA mostró que el fósforo se agrupó con otras variables relacionadas con la dinámica del nitrógeno (NH_3 y NO_3), mientras que el silicio constituyó un gradiente independiente estrechamente asociado con la respuesta de las diatomeas. En conjunto, estos resultados indican que el fósforo no actuó como un nutriente limitante del sistema, sino como un recurso requerido para sostener el crecimiento algal una vez favorecido por la disponibilidad de silicio.

El efecto del ácido monosilícico no debe interpretarse únicamente a partir de cambios en la abundancia absoluta de las diatomeas, sino considerando la reorganización funcional de la comunidad fitoplanctónica y la modificación de las relaciones estequiométricas que

regulan la competencia entre grupos algales. La suplementación con silicio favoreció un escenario ecológico caracterizado por una mayor participación relativa de diatomeas, una reducción de cianobacterias, una mayor actividad fotosintética y cambios en la dinámica de utilización de nutrientes, todos ellos procesos estrechamente relacionados con una mayor estabilidad del ecosistema de cultivo.

Estos resultados apoyan el uso del ácido monosilícico como una herramienta potencial para el manejo preventivo de la comunidad fitoplanctónica en sistemas de precría de *P. vannamei*. No obstante, debido a la elevada complejidad de las interacciones ecológicas presentes en estos sistemas, futuros estudios deberían incorporar el monitoreo simultáneo del zooplancton herbívoro, las comunidades bacterianas y los flujos biogeoquímicos de nitrógeno, fósforo y silicio, con el fin de comprender de manera integral los mecanismos que determinan la respuesta del fitoplancton a la suplementación con silicio.

10. CONCLUSIONES

La aplicación de ácido monosilícico no mostró diferencias significativas en la abundancia de diatomeas durante el período experimental; sin embargo, promovió una tendencia biológica hacia una mayor representación relativa de este grupo fitoplanctónico, evidenciando que su efecto estuvo condicionado por la dinámica temporal del sistema y por la disponibilidad simultánea de otros nutrientes.

La composición de la comunidad fitoplanctónica mostró una reorganización favorable durante el experimento, caracterizada por un incremento progresivo de las diatomeas y las clorofitas, acompañado por una disminución de la abundancia relativa de cianobacterias. Estos cambios sugieren una mayor estabilidad ecológica del sistema, aun cuando las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas.

Las concentraciones de silicio disuelto presentaron una marcada variación temporal, con periodos de disminución seguidos de recuperación, comportamiento consistente con los procesos de consumo por las diatomeas y regeneración del nutriente dentro del sistema. De igual manera, las fluctuaciones observadas en las diferentes formas del nitrógeno y en el fosfato evidenciaron una intensa dinámica de transformación y reciclaje de nutrientes durante la fase de precría.

La aplicación de ácido monosilícico mostró una respuesta favorable en la relación entre la abundancia de diatomeas frente a las variables ambientales durante la precría. Entre los tratamientos suplementados, el T1 mostró un incremento en las diatomeas, el cual estuvo asociado con una mayor utilización del silicio disuelto, este resultado fue evidenciado por la relación inversa y significativa registrada con el SiO₂. En cuanto a T2 se observa una mayor actividad fotosintética y una dinámica ambiental distinta influenciada por el aumento de oxígeno disuelto, el Ph y las formas oxidadas del nitrógeno, es decir que, las dosis evaluadas generaron respuestas ecológicas diferenciadas entre los tratamientos suplementados.

Los análisis multivariados y de correlación evidenciaron que la dinámica del sistema respondió a la interacción de múltiples variables ambientales, por lo que el efecto del ácido monosilícico debe interpretarse como un factor modulador del equilibrio ecológico más que como un nutriente capaz de incrementar, por sí solo, la abundancia de diatomeas.

En función de los resultados obtenidos, no se rechazó la hipótesis nula, debido a que no se evidenciaron diferencias significativas en el crecimiento y abundancia de diatomeas entre tratamientos. No obstante, se observaron respuestas biológicas favorables y diferencias significativas en variables específicas de calidad del agua, lo que evidencia un efecto modulador del ácido monosilícico sobre el sistema de cultivo de la eta de precría.

11. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios durante un periodo de cultivo más prolongado y con un mayor número de réplicas experimentales para confirmar si la tendencia observada hacia una mayor abundancia relativa de diatomeas y los cambios en la estructura fitoplanctónica se mantienen en el tiempo y alcanzan diferencias estadísticas significativas.

Debido a que la dosis correspondiente al tratamiento T1 en piscinas de precrías mostró datos favorables en la reorganización de la comunidad fitoplanctónica y en el oxígeno disuelto, es importante realizar estudios de seguimientos ya que podría representar una alternativa de manejo más eficiente.

Se recomienda que futuras investigaciones evalúen de manera conjunta las relaciones estequiométricas N:P:Si (Si:N, Si:P y N:P), junto con la composición específica de la comunidad de diatomeas, mediante la identificación y el seguimiento de las especies predominantes. Esto permitirá determinar qué especies presentan una mayor respuesta y capacidad de predominancia bajo diferentes disponibilidades de ácido monosilícico, así como establecer con mayor precisión la relación entre la disponibilidad de silicio, la dinámica del fitoplancton y la calidad del agua durante la precría.

Se recomienda monitorear e incorporar de manera sistemática el conteo y la identificación del zooplancton como indicadores complementarios de la dinámica y predominancia del fitoplancton. Asimismo, se recomienda correlacionar la variación de la concentración de silicio disponible con la abundancia de diatomeas y del zooplancton, con el propósito de determinar si la disminución del silicio está asociada con un incremento de las diatomeas y si este cambio en la comunidad fitoplanctónica se refleja posteriormente en la estructura y abundancia del zooplancton. Este enfoque permitiría comprender de manera más integral las interacciones entre silicio, diatomeas, fitoplancton y zooplancton durante la precría de *Penaeus vannamei*.

En cuanto a los parámetros productivos del camarón, se recomienda considerar en futuros estudios el crecimiento, supervivencia, conversión alimenticia y estado sanitario, para determinar si las modificaciones observadas en la comunidad fitoplanctónica generan beneficios directos sobre el rendimiento del cultivo.

12. REFERENCIAS

Abdelhay, R. A., El-Mor, M. S., Salem, M. A., Al-Sagheer, A. A., Abd-Elhakim, Y. M., Hassan, B. A., y Mounes, H. A. (2025). Effect of Nitrogen Sources on Diatoms Growth and Nutritional Value for Enhancing *Litopenaeus vannamei* Larval Performance. *Animals*, 15(4), 466. <https://doi.org/10.3390/ani15040466>

Acevedo-González, A., Siqueiros-Beltrones, D. A., y Gárate-Lizárraga, I. (2010). Dinoflagellates in shrimp culture ponds under typical production conditions. *CICIMAR Océánides*, 25(1), 83–88. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v25i1.83>

Ali, Y., Felafel, M., y Hussian, A. E. (2025). Effect of zeolite on aquaculture water quality, fish and microalgae growth. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(1), 217–241. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.404119>

Alpuche, J., Pereyra, A., y Agundis, C. (2005). Respuestas bioquímicas de camarones marinos a factores ambientales. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 6(5), 1–10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63617216008>

Anderson, J. L., Valderrama, D., y Jory, D. E. (2016). Global shrimp survey: GOAL 2016. *Global Aquaculture Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/global-shrimp-survey-goal-2016/>

Anderson, J. L., Asche, F., y Garlock, T. (2019). Economics of Aquaculture Policy and Regulation. *Annual Review of Resource Economics*, 11, 101–123. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093750>

Annenkov, V. V., Danilovtseva, E. N., y Gordon, R. (2021). Steps of silicic acid transformation to siliceous frustules: Main hypotheses and discoveries. In V. V. Annenkov, J. Seckbach, & R. Gordon (Eds.), *Diatom morphogenesis* (pp. 301–347). Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119488170.ch13>.

Aram, L., de Haan, D., Varsano, N., Gilchrist, J. B., Heintze, C., Rotkopf, R., y Gal, A. (2024). Intracellular morphogenesis of diatom silica is guided by local variations in membrane curvature. *Nature Communications*, 15(1), 7888. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52150-5>

Arambul-Muñoz, E., Ponce-Palafox, J. T., Claro De Los Santos, R., Aragón-Noriega, E. A., Rodríguez-Domínguez, G., y Castillo-Vargasmachuca, S. G. (2019). Influence of stocking density on production and water quality of a photo-heterotrophic intensive system of white shrimp (*Penaeus vannamei*) in circular lined grow-out ponds, with minimal water replacement. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 47(3). <https://doi.org/10.3856/vol47-issue3-fulltext-7>

Ariadi, H., Fadjar, M., Mahmudi, M., y Supriatna. (2019). The relationships between water quality parameters and the growth rate of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in intensive ponds. *AACL Bioflux*, 12(6), 2103–2116. <https://bioflux.com.ro/docs/2019.2103-2116.pdf>

Armbrust, E. V. (2009). The life of diatoms in the world's oceans. *Nature*, 459(7244), 185–192. <https://doi.org/10.1038/nature08057>

Arzola-González, J. F., Flores-Campaña, L. M., Izabal-Ceja, A., y Gutiérrez-Rubio, Y. (2008). Crecimiento de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) en un estanque rústico a baja salinidad. *Revista AquaTIC*, (28), 8–15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49418026002>

Ashour, M., Ringø, E., El-Haron, E., y Goda, A. M. A. (2025). The importance of plankton in marine fish and shellfish larval nutrition. En M. Atamanalp, M. Momin, G. Alak, A. Uçar, & V. Parlak (Eds.), *Emerging trends in fisheries: Sustainable practices and new perspectives*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008788>

Bai, D., Li, X., Liu, Z., Wan, L., Song, C., Zhou, Y., y Cao, X. (2023). Nitrogen and phosphorus turnover and coupling in ponds with different aquaculture species. *Aquaculture*, 563, 738997. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738997>

Bastos, C. R., Maia, I. B., Pereira, H., Navalho, J., y Varela, J. C. (2022). Optimisation of biomass production and nutritional value of two marine diatoms (Bacillariophyceae), *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros calcitrans*. *Biology*, 11(4), 594. <https://doi.org/10.3390/biology11040594>

Benoiston, A. S., Ibarbalz, F. M., Bittner, L., Guidi, L., Jahn, O., Dutkiewicz, S., y Bowler, C. (2017). The evolution of diatoms and their biogeochemical functions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1728), 20160397. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0397>

Bhattacharjya, R., Marella, T. K., Kumar, M., Kumar, V., y Tiwari, A. (2024). Diatom-assisted aquaculture: Paving the way towards sustainable economy. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 491–507. <https://doi.org/10.1111/raq.12848>

Boyd, C. E. (2018). Factores que afectan la eficiencia de los fertilizantes comerciales en la acuicultura. *Responsible Seafood Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/factores-que-afectan-la-eficiencia-de-los-fertilizantes-comerciales-en-la-acuicultura/>

Boyd, C. E. (2020). Microorganisms and water quality. En *Water quality: An introduction* (3.^a ed., pp. 233–267). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8_12

Boyd, C. E., y Musig, Y. (1981). Orthophosphate uptake by phytoplankton and sediment. *Aquaculture*, 22, 165–173. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(81\)90142-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(81)90142-3)

Boyd, C. E., y Tucker, C. S. (1998). Pond Aquaculture Water Quality Management. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5407-3>

Boyd, P. W. (2002). Environmental factors controlling phytoplankton processes in the Southern Ocean. *Journal of Phycology*, 38(5), 844–861. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2002.t01-1-01203.x>

Brenckman, C. M., Parameswarappa Jayalakshamma, M., Pennock, W. H., Ashraf, F., y Borgaonkar, A. D. (2025). A review of harmful algal blooms: causes, effects, monitoring, and prevention methods. *Water*, 17(13), 1980. <https://doi.org/10.3390/w1713198>

Briggs, M. (2009). *Penaeus vannamei*. En V. Crespi y M. New (Eds.), *Cultured aquatic species fact sheets*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Burford, M. A., y Williams, K. C. (2001). The fate of nitrogenous waste from shrimp feeding. *Aquaculture*, 198(1–2), 79–93. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00589-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00589-5)

Burford, M. A., Thompson, P. J., McIntosh, R. P., Bauman, R. H., y Pearson, D. C. (2003). Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm. *Aquaculture*, 229, 129–145. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00014-0)

Canfield, D. E., Kristensen, E., y Thamdrup, B. (2005). The phosphorus cycle. *Advances in Marine Biology*, 48, 419–440. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(05\)48011-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(05)48011-6)

Chen, Z., Li, J., Zhai, Q., Chang, Z., y Li, J. (2024). Nitrogen cycling process and application in different prawn culture modes. *Reviews in Aquaculture*, 16(4), 1580–1602. <https://doi.org/10.1111/raq.12912>

Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Hunt, R. W., y Das, K. C. (2010). Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications. *Bioresource Technology*, 101(9), 3097–3105. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.026>

Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., y Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: Causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4), Article 10. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/>

Chong-Robles, J., Charmantier, G., Boulo, V., Lizárraga-Valdez, J., Enríquez-Paredes, L. M., y Giffard-Mena, I. (2014). Osmoregulation pattern and salinity tolerance of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* during post-embryonic development. *Aquaculture*, 422–423, 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.034>

Cohen, J. M., Samocha, T. M., Fox, J. M., Gandy, R. L., y Lawrence, A. L. (2005). Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *Litopenaeus vannamei* using limited discharge and biosecure management tools. *Aquacultural Engineering*, 32(3–4), 425–442. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.005>

Conley, D. J., Kilham, S. S., y Theriot, E. C. (1989). Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limnology and Oceanography*, 34(1), 205–213. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.1.0205>

Contreras-Espinosa, F., Rivera-Guzmán, N. E., y Segura-Aguilar, R. (2005). Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente del Golfo de México. *Hidrobiológica*, 15(3), 299–310. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972005000300006

Cueva, S., Alborno, V., y Avellán, L. (2007). *Ecuador: Binding constraints to growth* [Working paper]. Inter-American Development Bank. <http://www.udla.edu.ec/wp-content/uploads/2013/12/pubCSI-108.pdf>

Datta, A., Marella, T. K., Tiwari, A., y Wani, S. P. (2019). The diatoms: From eutrophic indicators to mitigators. In S. K. Gupta & F. Bux (Eds.), *Application of microalgae in wastewater treatment: Volume I: Domestic and industrial wastewater treatment* (pp. 19–40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13913-1_2

Di Costanzo, F., Di Dato, V., y Romano, G. (2023). Diatom–bacteria interactions in the marine environment: Complexity, heterogeneity, and potential for biotechnological applications. *Microorganisms*, 11(12), 2967. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122967>

Dorgham, M. M. (2014). Effects of eutrophication. En A. A. Ansari & S. S. Gill (Eds.), *Eutrophication: Causes, consequences and control* (Vol. 2, pp. 29–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7814-6_3

Emerenciano, M. G. C., Arnold, S. J., y Perrin, T. (2022). Sodium metasilicate supplementation in culture water on growth performance, water quality and economics of indoor commercial-scale biofloc-based *Litopenaeus vannamei* culture. *Aquaculture*, 560, 738566. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738566>

Li, E. C., Chen, L., Zeng, C., Chen, X., Yu, N., Lai, Q., y Qin, J. G. (2007). Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white

shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities. *Aquaculture*, 265(1–4), 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.02.018>

Exley, C., Guerriero, G., y Lopez, X. (2019). Silicic acid: The omniscient molecule. *Science of the Total Environment*, 665, 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.197>

Falkowski, P. G., Fenchel, T., y DeLong, E. F. (2008). *The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles*. *Science*, 320(5879), 1034–1039. <https://doi.org/10.1126/science.1153213>

Feng, T.-Y., Yang, Z.-K., Zheng, J.-W., Xie, Y., Li, D.-W., Murugan, S. B., Yang, W.-D., Liu, J.-S., y Li, H.-Y. (2015). Examination of metabolic responses to phosphorus limitation via proteomic analyses in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Scientific Reports*, 5, 10373. <https://doi.org/10.1038/srep10373>

Fernandes, V., Sabu, E. A., Shivaramu, M. S., Gonsalves, M. J. B. D., y Sreepada, R. A. (2019). Dynamics and succession of plankton communities with changing nutrient levels in tropical culture ponds of whiteleg shrimp. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 639–655. <https://doi.org/10.3354/aei00341>

Ferreira-Marinho, Y., Otavio-Brito, L., da Silva, C. V. F., dos Santos, I. G. S., y Olivera-Gálvez, A. (2014). Effect of addition of *Navicula* sp. on plankton composition and postlarvae growth of *Litopenaeus vannamei* reared in culture tanks with zero water exchange. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3), 427–437. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-4>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action*. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>

Frías-Espericueta, M. G., y Páez-Osuna, F. (2001). Toxicidad de los compuestos del nitrógeno en camarones. En F. Páez-Osuna (Ed.), *Camaronicultura y medio ambiente* (pp. 253–276). Universidad Nacional Autónoma de México; El Colegio de Sinaloa.

Ghasemi, Z., Sourinejad, I., Kazemian, H., y Rohani, S. (2018). Application of zeolites in aquaculture industry: A review. *Reviews in Aquaculture*, 10(1), 75–95. <https://doi.org/10.1111/raq.12148>

Gómez-Luna, L. M. (2007). Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19(2), 3–20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543707001>

Hargreaves, J. A. (1998). Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 166(3–4), 181–212. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00298-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00298-1)

Hecky, R. E., y Kilham, P. (1988). Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography*, 33(4, Part 2), 796–822. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4part2.0796>

Herath, S. S., y Satoh, S. (2015). Environmental impact of phosphorus and nitrogen from aquaculture. En D. A. Davis (Ed.), *Feed and feeding practices in aquaculture* (pp. 369–386). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00015-5>

Hernández Mancipe, L. E., Londoño Vélez, J. I., Hernández García, K. A., y Torres Hernández, L. C. (2019). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 14(1), 70–99. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.14.1.6>

Hernández-Gurrola, J. A. (2016). *Caracterización de la calidad de agua en un sistema intensivo de cultivo de camarón blanco Litopenaeus vannamei, en condiciones de alta salinidad con recambio de agua limitado*. Repositorio Institucional CIBNOR. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/42>

Hong, A. H., Hargan, K. E., Williams, B., Nuangsaeng, B., Siriwong, S., Tassawad, P., Chaiharn, C., y Los Huertos, M. (2020). Examining molluscs as bioindicators of shrimp aquaculture effluent contamination in a southeast Asian mangrove. *Ecological Indicators*, 115, 106365. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106365>

Jiménez-Guzmán, F. (2009). *Técnica de diagnóstico presuntivo para enfermedades de camarón* Comité de Sanidad Acuícola del Estado de Guerrero.

Kathyayani, S. A., Poornima, M., Sukumaran, S., Nagavel, A., y Muralidhar, M. (2019). Effect of ammonia stress on immune variables of Pacific white shrimp *Penaeus vannamei* under varying levels of pH and susceptibility to white spot syndrome virus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109626. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109626>

Khalili, R., y Moridi, A. (2025). A comprehensive review of eutrophication in water resources: From identifying contributing factors to proposing management strategies. *Interdisciplinary Journal of Civil Engineering*, 1(1), 36–49. <https://doi.org/10.48308/ijce.2025.240047.1003>

Kolbe, F., y Brunner, E. (2022). Silicic acid uptake and storage by diatoms. In A. Falciatore & T. Mock (Eds.), *The molecular life of diatoms* (pp. 345–365). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92499-7_13

Krummenauer, D., Peixoto, S., Cavalli, R. O., Poersch, L. H., y Wasielesky, W., Jr. (2011). Superintensive culture of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a biofloc technology system in Southern Brazil at different stocking densities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 42(5), 726–733. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2011.00507.x>

Li, E., Chen, L., Zeng, C., Chen, X., Yu, N., Lai, Q., y Qin, J. G. (2007). Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities. *Aquaculture*, 265(1–4), 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.02.018>

Liang, Y., Zhang, G., Wan, A., Zhao, Z., Wang, S., y Liu, Q. (2019). Nutrient-limitation induced diatom-dinoflagellate shift of spring phytoplankton community in an offshore shellfish farming area. *Marine Pollution Bulletin*, 141, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.009>

Llario, F., Rodilla, M., Escrivá, J., Falco, S., y Sebastiá-Frasquet, M. T. (2019). Phytoplankton evolution during the creation of a biofloc system for shrimp culture.

International Journal of Environmental Science and Technology, 16(1), 211–222.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1655-5>

Lovio-Fragoso, J. P., de Jesús-Campos, D., López-Elías, J. A., Medina-Juárez, L. Á., Fimbres-Olivarría, D., y Hayano-Kanashiro, C. (2021). Biochemical and molecular aspects of phosphorus limitation in diatoms and their relationship with biomolecule accumulation. *Biology*, 10(7), 565. <https://doi.org/10.3390/biology10070565>

Makareviciute-Fichtner, K., Matthiessen, B., Sommer, U., y Lotze, H. K. (2020). *Declining silica availability: A challenge in the North Atlantic region?* European Geosciences Union General Assembly 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4793>

Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., y Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. In M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, & B. Hawrylak-Nowak (Eds.), *Plant nutrients and abiotic stress tolerance* (pp. 171–190). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7

Marinho, Y. F., Brito, L. O., Silva Campos, C. V. F. da, Severi, W., Andrade, H. A., y Gálvez, A. O. (2017). Effect of the addition of *Chaetoceros calcitrans*, *Navicula* sp. and *Phaeodactylum tricornutum* (diatoms) on phytoplankton composition and growth of *Litopenaeus vannamei* (Boone) postlarvae reared in a biofloc system. *Aquaculture Research*, 48(8), 4155–4164. <https://doi.org/10.1111/are.13235>

Martínez-Córdova, L. R., Emerenciano, M., Miranda-Baeza, A., y Martínez-Porchas, M. (2015). Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: An updated review. *Reviews in Aquaculture*, 7(2), 131–148. <https://doi.org/10.1111/raq.12058>

Martínez-Montaña Emmanuel, Gustavo A. Rodríguez-Montes de Oca, José C. Román-Reyes, Rosario Pacheco-Marges, Alejandro Llanos y Isaura Bañuelos- Vargas. (2020). Diatomaceous earth application to improve shrimp aquaculture: growth performance and proximate composition of *Penaeus vannamei* juveniles reared in biofloc at two salinities. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(2): 197-206, 2020 DOI: 10.3856/vol48-issue2-fulltext-2386

Martin-Jézéquel, V., Hildebrand, M., & Brzezinski, M. A. (2000). Silicon metabolism in diatoms: Implications for growth. *Journal of Phycology*, 36(5), 821–840. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.00019.x>

Martin-Jézéquel, V., Lopez, P. J., y Hoagland, K. D. (2003). Silicon: A central metabolite for diatom growth and morphogenesis. *Progress in Molecular and Subcellular Biology*, 33, 99–124. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55486-5_4

McNair, H. M., Brzezinski, M. A., y Krause, J. W. (2018). Silica content decreases in upwelling diatom populations to avoid growth limitation. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(11), fiy185. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14431>

Molina, C., y Orellana-Tandazo, A. P. (2001). Efecto de la salinidad y la relación proteína/energía en el rendimiento de *Litopenaeus vannamei*. *Panorama Acuícola*, 6(5), 53.

Moreno-Figueroa, L. D. (2014). *Cultivo intensivo de camarón blanco Litopenaeus vannamei en un sistema foto-autotrófico de bajo recambio de agua*. 9th International Aquaculture Forum and LACQUA 2014, Guadalajara, México.

Moriarty, D. J. W. (1997). The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture*, 151(1–4), 333–349. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01487-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01487-1)

Orellana-Tandazo, A. P. (2000). *Efecto de diferentes niveles de salinidad y balances proteína/energía en el crecimiento de Penaeus vannamei*. Repositorio DSpace ESPOL. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/8577>

Paasche, E. (1980). Silicon. En I. Morris (Ed.), *The physiological ecology of phytoplankton* (pp. 259–284). University of California Press.

Paerl, H. W., y Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995–1010. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>

Paerl, H. W., Fulton, R. S., Moisander, P. H., y Dyble, J. (2001). Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *The Scientific World Journal*, 1, 76–113. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.16>

Palafox, F., y Soto, Z. M. (2001). *Relación entre la producción y algunas variables de calidad de agua en un cultivo semi-intensivo de Litopenaeus vannamei en una granja comercial.*

Passow, U., Engel, A., y Ploug, H. (2003). The role of aggregation for the dissolution of diatom frustules. *FEMS Microbiology Ecology*, 46(3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00199-5](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00199-5)

Porchas-Cornejo, M. A., Martínez-Córdova, L. R., Ramos-Trujillo, L., Hernández-López, J., Martínez-Porchas, M., y Mendoza-Cano, F. (2011). Effect of promoted natural feed on the production, nutritional, and immunological parameters of *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) semi-intensively farmed. *Aquaculture Nutrition*, 17(2), e622–e628. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00809.x>

Porchas-Cornejo, M. A., Martínez-Córdova, L. R., Martínez-Porchas, M., Barraza-Guardado, R., y Ramos-Trujillo, L. (2013). Study of zooplankton communities in shrimp earthen ponds, with and without organic nutrient-enriched substrates. *Aquaculture International*, 21(1), 65–73. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9534-4>

Raven, J. A., y Waite, A. M. (2004). The evolution of silicification in diatoms: Inescapable sinking and sinking as escape. *New Phytologist*, 162(1), 45–61. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01022.x>

Siqueiros-Beltrones, D. A., y Acevedo-González, A. (2010). Changes in benthic diatom assemblages in shrimp culture ponds. *CICIMAR Oceanides*, 25(1), 39–51. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v25i1.78>

Stieg, A., Biskaborn, B. K., Herzsuh, U., Marent, A., Strauss, J., Wilhelms-Dick, D., Pestryakova, L. A., y Meyer, H. (2025). Diatom shifts and limnological changes in a Siberian boreal lake: A multiproxy perspective on climate warming and anthropogenic air pollution. *Biogeosciences*, 22, 2327–2350. <https://doi.org/10.5194/bg-22-2327-2025>

Tarunamulia, T., Paena, M., Akmal, A., Kamariah, K., Mustafa, A., Syaichudin, M., y Umar, N. A. (2026). Rice husk ash-derived biosilica as a biogeochemical regulator for

ameliorating acid sulfate soils in shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nursery systems. *Aquaculture International*, 34(5), Article 163. <https://doi.org/10.1007/s10499-026-02566-3>

Tréguer, P. J., y De La Rocha, C. L. (2013). The world ocean silica cycle. *Annual Review of Marine Science*, 5, 477–501. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172346>

Vargas Domínguez, C. A. (2023). *Evaluación en la ecoeficiencia de un sistema de cultivo hiperintensivo de camarón blanco del Pacífico (Litopenaeus vannamei) con tecnología de bioflóculos y maduración microbiológica asistida*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.dgb.unam.mx/items/583ee570-16d1-4895-8559-a748576af9a6>

Villarreal, H. (2023). Shrimp farming advances, challenges, and opportunities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(5), 1092–1095. <https://doi.org/10.1111/jwas.13027>

Volcani, B. E. (1978). Role of silicon in diatom metabolism and silicification. En G. Bendz, I. Lindqvist, & V. Runnström-Reio (Eds.), *Biochemistry of silicon and related problems* (Vol. 40, pp. 177–204). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-4018-8_8

Wedemeyer, G. A. (1996). Interactions with water quality conditions. En *Physiology of fish in intensive culture systems* (pp. 60–110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6011-1_3

Xia, L. Z., Yang, L. Z., y Yan, M. C. (2004). Nitrogen and phosphorus cycling in shrimp ponds and the measures for sustainable management. *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2–3), 245–251. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039587.64830.43>

Yang, X.-E., Wu, X., Hao, H.-L., y He, Z.-L. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9(3), 197–209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>

Yool, A., y Tyrrell, T. (2003). Role of diatoms in regulating the ocean's silicon cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1103. <https://doi.org/10.1029/2002GB002018>

Yun, S. C., Jeong, H., Lee, J. S., Kim, J. H., Kim, I. C., Maszczyk, P., Yang, Z., Hagiwara, A., y Lee, J. S. (2026). A review of ammonia toxicity on aquatic organisms: Species-specific responses, microbial shifts, and environmental interactions. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 300, Article 110388. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2025.110388>

Yusoff, F. M., Zubaidah, M. S., Matias, H. B., y Kwan, T. S. (2002). Phytoplankton succession in intensive marine shrimp culture ponds treated with a commercial bacterial product. *Aquaculture Research*, 33(4), 269–278. <https://doi.org/10.1046/j.1355-557x.2002.00671.x>

13. ANEXOS

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Diatomeas	21	143130,00	60648,07	0,96	0,7327
AT mg/L	21	0,91	0,45	0,95	0,6431
NH3 Tóxico mg/L	21	0,07	0,05	0,79	<0,0001
NO2 mg/L	21	0,18	0,13	0,81	<0,0001
NO3 mg/L	21	0,62	0,12	0,95	0,6828
PO4 mg/L	21	0,65	0,23	0,97	0,8926
Relación N:P	21	10,34	3,69	0,96	0,7924
SiO2mg/L	21	15,22	5,61	0,61	<0,0001
Oxígeno	21	2,40	0,51	0,94	0,4505
pH	21	8,12	0,33	0,91	0,1195
Temperatura	21	23,88	1,32	0,91	0,1259
Salinidad	21	0,50	0,00	sd	>0,9999

Ilustración 9. Prueba Shapiro-willks aplicada para observar normalidad de los parámetros evaluados.

Tukey HSD test; variable Abundancia (cel/mL) (Spreadsheet1)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 1731E6, df = 6,0000					
Cell No.	Unidades experimentales	{1}	{2}	{3}	
1	T1		0,899907	0,228845	
2	T2	0,899907		0,130884	
3	CONTROL	0,228845	0,130884		

Ilustración 10. Prueba ANOVA de una vía sin diferencia significativa entre tratamientos del muestreo #7

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
AT mg/L	C	7	0,80	0,37	0,86	1,89	0,3874
AT mg/L	T1	7	0,98	0,68	0,84		
AT mg/L	T2	7	1,08	0,43	1,10		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
NH3 Tóxico mg/L	C	7	0,08	0,06	0,05	0,56	0,7508
NH3 Tóxico mg/L	T1	7	0,09	0,09	0,05		
NH3 Tóxico mg/L	T2	7	0,09	0,06	0,08		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
NO2 mg/L	C	7	0,18	0,12	0,15	0,72	0,6961
NO2 mg/L	T1	7	0,16	0,08	0,15		
NO2 mg/L	T2	7	0,19	0,09	0,17		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
NO3 mg/L	C	7	0,63	0,09	0,62	1,09	0,5796
NO3 mg/L	T1	7	0,58	0,14	0,56		
NO3 mg/L	T2	7	0,64	0,13	0,59		

Ilustración 11. Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (AT, NH₃ Tóxico, NO₂, NO₃).

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PO4 mg/L	C	7	0,59	0,19	0,61	2,94	0,2292
PO4 mg/L	T1	7	0,66	0,41	0,60		
PO4 mg/L	T2	7	0,86	0,32	0,88		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Relación N:P	C	7	9,55	1,69	10,16	10,84	0,0044
Relación N:P	T1	7	9,17	2,10	8,69		
Relación N:P	T2	7	5,86	1,65	6,12		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
SiO ₂ mg/L	C	7	17,81	0,57	17,57	6,38	0,0410
SiO ₂ mg/L	T1	7	13,75	3,95	12,86		
SiO ₂ mg/L	T2	7	12,19	4,18	12,57		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Oxígeno	C	7	1,85	0,35	1,73	12,29	0,0021
Oxígeno	T1	7	2,67	0,27	2,70		
Oxígeno	T2	7	2,69	0,36	2,63		

Ilustración 12. Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (PO₄, Relación N:P, SiO₂ y Oxígeno).

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
pH	C	7	8,19	0,41	8,36	0,51	0,7760
pH	T1	7	8,05	0,38	7,95		
pH	T2	7	8,12	0,20	8,07		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Temperatura	C	7	24,99	1,98	25,10	0,68	0,7134
Temperatura	T1	7	25,85	1,98	25,88		
Temperatura	T2	7	24,97	1,94	25,58		

Variable	Tratamientos	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Salinidad	C	7	0,50	0,00	0,50	0,00	sd
Salinidad	T1	7	0,50	0,00	0,50		
Salinidad	T2	7	0,50	0,00	0,50		

Ilustración 13. Prueba de Kruskal Wallis aplicada a variables ambientales (pH, Temperatura y Salinidad).

Correlations (Spreadsheet1)											
Marked correlations are significant at p < ,05000											
N=7 (Casewise deletion of missing data)											
Variable	AT mg/L	NH3 Tóxico mg/L	NO2 mg/L	NO3 mg/L	PO4 mg/L	Relación N:P	SiO2mg/L	Oxígeno	pH	Temperatura	Salinidad
Abundancia	-.4461	-.4630	.0273	.1631	-.4547	-.6336	-.9294	.2032	.1085	-.1313	--
	p=.316	p=.295	p=.954	p=.727	p=.305	p=.127	p=.002	p=.662	p=.817	p=.779	p=---

Ilustración 14. Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento 1 (T1)

Correlations (Spreadsheet1)											
Marked correlations are significant at p < ,05000											
N=7 (Casewise deletion of missing data)											
Variable	AT mg/L	NH3 Tóxico mg/L	NO2 mg/L	NO3 mg/L	PO4 mg/L	Relación N:P	SiO2mg/L	Oxígeno	pH	Temperatura	Salinidad
Abundancia	-.4443	-.0541	.6048	.6037	-.4777	.0457	-.5354	.7428	.7345	-.5717	--
	p=.318	p=.908	p=.150	p=.151	p=.278	p=.923	p=.216	p=.056	p=.060	p=.180	p=---

Ilustración 15. Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento 2 (T2)

Correlations (Spreadsheet1)											
Marked correlations are significant at p < ,05000											
N=7 (Casewise deletion of missing data)											
Variable	AT mg/L	NH3 Tóxico mg/L	NO2 mg/L	NO3 mg/L	PO4 mg/L	Relación N:P	SiO2mg/L	Oxígeno	pH	Temperatura	Salinidad
Abundancia	-.3652	-.0485	.3643	-.2912	-.3653	.4256	.4014	.3133	.4626	.2628	--
	p=.420	p=.918	p=.422	p=.526	p=.420	p=.341	p=.372	p=.494	p=.296	p=.569	p=---

Ilustración 16. Correlación de Pearson entre la abundancia y parámetros fisicoquímicos del tratamiento Control (T0)



Ilustración 17. Vista al microscopio de diatomeas con objetivo de 40x



Ilustración 18. Recolección de muestras en campo

Tabla 11. Cronograma de actividades de tesis de grado

ACTIVIDADES	MES	MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	DIA	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
SELECCIÓN DE PRECRÍAS EN CAMARONERA				X																									
PREPARACIÓN DE PISCINAS: TRATAMIENTOS Y CONTROL					X	X	X																						
TOMA DE MUESTRAS Y ANALISIS DE AGUA EN TIEMPO CERO PARA ANALISIS QUIMICOS Y CONTEO DE FITOPLANCTON					X	X	X																						
SIEMBRA DE POSTLARVAS EN PRECRIAS					X	X	X																						
APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS						X	X	X	X	X	X																		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS AGUA PARA ANÁLISIS QUÍMICOS Y CONTEO DE FITOPLANCTON (3 VECES/SEMANA)						X	X	X	X	X	X	X																	
ANÁLISIS DE DATOS CON PROGRAMAS ESTADÍSTICOS											X	X	X	X	X														
RESULTADOS Y DISCUSIONES														X	X	X	X	X											
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES																		X	X										
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ANEXOS														X	X	X	X	X	X										
RECEPCIÓN Y REVISIÓN DE TESIS DE INVESTIGACION																			X	X									
SUSTENTACIÓN DE TESIS DE INVESTIGACION																										X	X		